

o. PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. H. KARL KORDINA  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Lehrstuhl für Massivbau

TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
BRAUNSCHWEIG

Verhalten der Biegedruckzone nach schneller,  
hoher und kurzzeitiger Belastung

von

Dipl.-Phys. K. Paulmann

Dr.-Ing. J. Steinert

Braunschweig 1983

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Postfach 105453  
3300 Braunschweig

Die Untersuchungen wurden im Auftrag und mit finanzieller Unterstützung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau durchgeführt: Aktenzeichen B I 7 - 81 07 05 - 285

Postsendungen:  
3300 Braunschweig, Beethovenstraße 52  
Fernschreiber: B 52 698 lbstb d  
Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher:  
391 5411  
Ortskennzahl 0531  
Kommt keine Verbindung zustande  
bitte 391 5431 wählen

Besuchszeiten:  
Montag bis Freitag 9 - 16 Uhr

## Zusammenfassung

Durch Voruntersuchungen des Verhaltens der Biegedruckzone von Beton anhand ausmittig beanspruchter Betonprismen ist bekannt, daß eine schnelle, kurzzeitige und hohe Biegebeanspruchung die statische Biegetragfähigkeit erhöht.

In dem hier besprochenen Anschlußvorhaben wurde versucht, die Eigentümlichkeit dieses Verhaltens der Biegedruckzone näher zu beleuchten. Aufgrund einer Vielzahl von Belastungsversuchen läßt sich nunmehr aussagen, daß die Erhöhung der Tragfähigkeit der Biegedruckzone nur dann zu erwarten ist, wenn die kurzzeitige Vorbeanspruchung mehr als 95 % der bei langsamer Prüfung erreichbaren Biegebruchspannung beträgt. Das Maß dieser Festigkeitssteigerung ist um so höher, je größer die Vorbeanspruchung gewählt wird, d.h. je größer die Ausfallquote ist: Die Festigkeitssteigerung beträgt 8 % bei 10 % vorzeitig versagender Prüfkörper bzw. 14 % bei ca. 40 % vorzeitigem Ausfall, sie kann nicht durch eine Auslese erklärt werden.

Keinen Einfluß auf dieses Verhalten haben Exzentrizität, Klima der Lagerung des Betons und die Belastungsgeschwindigkeit im variierten Rahmen; hingegen ist ein Mindest-Betonalter für die deutliche Ausprägung der Festigkeitssteigerung erforderlich.

Durch vergleichende optische Beobachtung der Rißentwicklung als Funktion der Dehnung und durch Anwendung der Quecksilberporosimetrie wurde eine Klärung darüber erlangt, inwieweit die Festigkeitssteigerung mit Strukturveränderungen des Betons verknüpft ist: Bei schneller, kurzzeitiger Belastung können eindeutig wesentlich größere Verformungen ohne Bruch erreicht werden als bei langsamer Beanspruchung; diese größeren Verformungen führen aber auch zu einem höheren Rißvolumen. Obwohl also vom Gefügezustand her gesehen der Bruch bereits eingeleitet ist, läßt eine schnell, kurzzeitig und hoch beanspruchte Biegedruckzone noch eine Traglaststeigerung bei nachfolgender langsamer Wiederbelastung zu.

### Summary

Preliminary investigations of concrete in flexure carried out on eccentrically loaded concrete prisms had shown that high impulsive flexural loading will increase the static flexural strength.

The subsequent investigations described here aimed at a better understanding of this peculiar behaviour of the flexural compression zone. On account of the large number of loading experiments carried out it could be shown that the flexural strength will increase only if the impulsive loading exceeds 95 % of the ultimate failure stress obtained with slow loading. The increase in strength will become greater as the preloading is increased. It will also result in a larger percentage of failure. For instance, for 10 % premature failure of the specimens the increase in strength is 8 % and for about 40 % failure it is 14 %. However, this increase in strength cannot be explained by a selection process.

Within the range of variations checked the eccentricity, the ambient climate during curing of concrete and the loading rate had no influence on the increase in strength. However, a minimum curing time is necessary to obtain a marked effect.

By optical inspection of the development of cracks as a function of strain and by means of mercury porosimetry relations between increase of strength and changes in the internal structure of the concrete could be found. With impulsive loading appreciably larger deformations may be obtained without failure than with slowly increasing load. However, these larger deformations also lead to larger crack volumes. Despite the crack patterns indicating the beginning of failure the load bearing capacity of a flexural compression zone which has been subjected to a high impulsive load is increased when subsequently loaded at a slow rate.

## 1. Einleitung

In dem im Jahre 1980 abgeschlossenen Forschungsvorhaben BI 7 - 810705 - 264 "Verhalten von Beton bei sehr kurzer Belastungsgeschichte" /1/ wurde das Trag- und Verformungsverhalten der Biegedruckzone von Beton im Hinblick auf Katastrophen-Lastfälle untersucht. Dabei wurde die Biegedruckzone von Stahlbetonbalken durch ausmittig druckbelastete Betonprismen nachgebildet, vergl. /2, 3/.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen war die Feststellung, daß durch eine schnell aufgebrachte, kurzzeitige, hohe Biegedruckbeanspruchung die statische Biegetragfähigkeit erhöht wird; bei zentrischer Belastung trat ein vergleichbarer Effekt nicht ein.

Im Rahmen des genannten Forschungsvorhabens wurde hauptsächlich der Einfluß der Parameter Betonrezeptur, Last-Exzentrizität und Belastungsgeschichte bei der Erstbelastung untersucht.

In dem Anschlußvorhaben, über das hier berichtet wird, sollten vorrangig durch experimentelle Untersuchungen die Ursachen des o.g. Effektes geklärt werden. Hierzu waren zunächst die Voraussetzungen näher zu bestimmen, unter denen eine Festigkeitssteigerung der Biegedruckzone eintritt, die Sicherheit quantitativer Angaben mußte erhöht werden (Verringerung der Ausfallquote bei der Erstbelastung). Für Struktur und Wasserhaushalt der Zementmatrix wesentliche Parameter wie Betonalter und Lagerungsart wurden in weiten Grenzen variiert, die belastungsbedingten Gefügeschädigungen der Biegedruckzone wurden qualitativ durch mikroskopische Rißfeststellung und quantitativ mit Hilfe der Quecksilber-Porosimetrie untersucht.

## 2. Durchführung der Belastungsversuche

Aus drei Betonen wesentlich unterschiedlicher Zusammensetzung wurden insgesamt über 300 Prismen mit den Abmessungen 70 x 120 x 300 mm<sup>3</sup> hergestellt, siehe Anlagen 1 und 2.

Die Versuchseinrichtung zur Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens ist in Anlage 3 beschrieben, ein in die Belastungseinrichtung eingebauter Prüfling ist in Anlage 4 abgebildet.

Die Erstbelastung in Höhe von ca. 30...120 % der mittleren statischen Traglast wurde in allen Fällen schnell aufgebracht (innerhalb ca. 10...50 ms), die anschließende "Resttragfähigkeitsprüfung" erfolgte - ebenso wie die Prüfung nicht vorbeanspruchter Vergleichsproben - langsam mit  $\dot{\sigma} \approx 0,5 \text{ N/mm}^2 \text{ s}$  entsprechend DIN 1048.

### 2.1. Versuchsparameter, Prüfplan

Folgende Versuchsparameter wurden variiert:

- Betonrezeptur und -festigkeit
- Betonalter
- Lagerungsbedingungen vor der Prüfung
- Exzentrizität
- Lasthöhe bei der schnellen Vorbelastung
- Lastanstiegsgeschwindigkeit bei der schnellen Vorbelastung
- Lagerungsbedingungen zwischen schneller Vorbelastung und nachfolgender (langsamer) Festigkeitsbestimmung.

Der Variationsbereich aller Parameter sowie die zugehörigen Prüflingszahlen sind im wesentlichen aus Anlage 5 ersichtlich, die Betonrezepturen und die Lagerungsbedingungen sind in den Anlagen 1 bzw. 6 ausführlich beschrieben.

Angeichts der Zahl der untersuchten Einflußgrößen und der für statistisch gesicherte Aussagen erforderlichen großen Prüflingszahlen (vergl. Anlage 7) war es unumgänglich, aus der Vielzahl der möglichen Parameterkombinationen einige charakteristische auszuwählen und zu unterstellen, daß sich Einflüsse verschiedener Parameter annähernd linear überlagern. (Z.B. wurde die Vorbelastungshöhe nur bei relativ altem Beton der Rezeptur II syste-

matisch variiert. Auch wenn bei jüngerem Beton anderer Rezeptur andere Festigkeitssteigerungen auftreten, kann die Abhängigkeit von der Vorbelastungshöhe in erster Näherung als gleich angenommen werden.)

Die Bestimmung von Festigkeitssteigerungen nach einer Vorbelastung setzt den Bezug auf die Festigkeit nicht vorbelasteter Prüflinge voraus. Für jede untersuchte Kombination von Versuchsparametern wurden daher annähernd gleich viele Prismen mit bzw. ohne Vorbelastung geprüft (s. Zeile 27 des Prüfplanes, Anlage 5).

## 2.2. Auswertung

Zur Kennzeichnung der schnellen Vorbeanspruchung und der danach erreichten, bei langsam-zügiger Belastung geprüften Biegedruckfestigkeit werden folgende Größen verwendet:

$$\sigma = \frac{F}{A} \cdot \frac{\epsilon_D - \epsilon_Z}{\epsilon_D} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} F = \text{äußere Last} \\ A = \text{geometrische Querschnittsfläche} \\ \epsilon_{D/Z} = \text{Betondehnung am Druck-/Zugrand} \end{array}$$

$$\dot{\sigma}_{SV} = \left. \frac{d\sigma}{dt} \right|_{F = 0,9 \cdot F_{\max}} \quad \text{Spannungsanstiegsgeschwindigkeit}$$

$$\sigma'_{SV} = \frac{\sigma_{SV} (F = 0,9 \cdot F_{\max})}{\sigma_L (F = 0,9 \cdot F_{\max})} \quad \begin{array}{l} \text{bezogene Druckspannung bei} \\ \text{schneller Vorbelastung} \end{array}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{LR} (F = 0,9 \cdot F_{\max})}{\bar{\sigma}_L (F = 0,9 \cdot F_{\max})} \quad \text{bezogene Biegedruckfestigkeit}$$

mit den Indices

SV: schnelle Vorbeanspruchung

LR: langsam-zügige Prüfung nach schneller Vorbeanspruchung (Restfestigkeitsermittlung),

L : langsam-zügige Prüfung nicht vorbelasteter Vergleichsprismen,

der Mittelwert  $\bar{\sigma}_L$  wird über alle Prüflinge der jeweiligen

Vergleichsgruppe (s. Zeile 27 des Prüfplans, Anlage 5) gebildet.

Durch den Bezug auf den Zeitpunkt  $0,9 \cdot F_{\max}$  werden Unsicherheiten der Dehnungsmessung beim Bruch vermieden. (Die hohe Zeitauflösung der Meßapparat-ur von 1 Messung pro ms läßt erkennen, daß beim Bruch häufig schon einige Millisekunden vor dem Abfall der Druckkraft lokale Betonzerstörungen - Ausbrechen der Druckzone, Aufreißen der Zugzone - auftreten, die die Ergebnisse der Dehnungsmessung fragwürdig erscheinen lassen.)

Wenn keine Dehnmeßstreifen verwendet werden konnten, wurden  $\sigma'_{SV}$  und  $\alpha$  sinngemäß als Quotienten der entsprechenden Lasten berechnet.

Die bezogene Biegedruckfestigkeit  $\alpha$  ist wie in dem früheren Forschungsvorhaben /1/ definiert, die dortigen Ergebnisse sind also direkt vergleichbar.

Zur Entscheidung, ob ein Versuchsparameter Einfluß auf die bezogene Biegedruckfestigkeit nach schneller Vorbelastung hat, werden in Abschnitt 4.2. die Mittelwerte  $\bar{\alpha}$  der zu verschiedenen Werten des Parameters gehörenden Prüflingsgruppen miteinander verglichen. Ob sich zwei Mittelwerte statistisch signifikant voneinander unterscheiden, wurde mit Hilfe des t-Tests beurteilt. Die zugehörigen Standardabweichungen sind in Abschnitt 4.2. ebenfalls angegeben.

In Anlage 7 ist zur Veranschaulichung grafisch dargestellt, welche Mittelwerts-Unterschiede in Abhängigkeit von Streuung und Probenzahl mit 95 % Sicherheit statistisch signifikant sind.

### 3. Durchführung der Gefügeuntersuchungen

Ursprünglich hatte die Absicht bestanden, mit Hilfe von Ultraschall-Meßverfahren (aktive Durchschallung oder Schallemissions-Analyse) Untersuchungen der Gefügeveränderungen während der schnellen Vorbelastung durchzuführen.

Apparative Schwierigkeiten mit Geräten aller ermittelbaren Hersteller (zu geringe Impulsfolgefrequenz, offensichtlich falsch Verarbeitung schnell aufeinander folgender Signale großer Amplitude, Überlagerung der eigentlichen Ultraschall-Signale durch Erschütterungen der Prüflinge bei der schnellen Belastung) waren jedoch mit vertretbarem Aufwand und in der zur

Verfügung stehenden Zeit nicht zu überwinden. Daher mußte das Konzept, Gefügedaten gleichzeitig mit Last- und Verformungsgrößen zu messen, aufgegeben werden.

Stattdessen wurde eine größere Anzahl von Prismen (insgesamt 25) unterschiedlich hoch und unterschiedlich schnell belastet und danach auf Gefügeveränderungen untersucht. Das Verfahren der Quecksilber-Porosimetrie erschien dazu besonders geeignet, weil es z.B. im Gegensatz zu mikroskopischen Verfahren quantitative Ergebnisse liefert, ein relativ großes Probenvolumen integral erfaßt und geringen Aufwand für Probenpräparation, Versuchsdurchführung und -auswertung erfordert.

Mikroskopische Untersuchungen wurden zusätzlich, aber in geringem Umfang durchgeführt.

### 3.1. Grundlagen der Quecksilber-Porosimetrie

Das Meßverfahren beruht auf der Eigenschaft des Quecksilbers, die meisten Feststoffoberflächen nicht zu benetzen. Erst durch zunehmenden äußeren Druck wird das Quecksilber gezwungen, in immer kleinere Hohlräume, Poren und Risse z.B. einer Betonprobe einzudringen. Zum Beispiel gilt für kreiszylinderförmige Poren der Zusammenhang

$$p = \frac{2 \sigma |\cos \varphi|}{R}$$

mit  $p$  = äußerer Druck auf das Quecksilber

$\sigma$  = Oberflächenspannung (= 0,480 N/m)

$\varphi$  = Kontaktwinkel ( $\approx 140^\circ$ )

$R$  = Querschnittsradius der vom Quecksilber erfüllten Poren;

aus der für zylindrische Poren mit elliptischem Querschnitt (kleine bzw. große Halbachse:  $r_1, r_2$ ) geltenden Abhängigkeit

$$p = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) |\cos \varphi|$$

läßt sich durch Grenzübergang  $r_2 \rightarrow \infty$  eine Formel für ausgedehnte, ebene Risse der Rißweite  $d$  ableiten:

$$p = \frac{2 \sigma |\cos \varphi|}{d}$$



Messung der Quecksilber-Eindringmenge bei wachsendem Druck ergibt also zunächst das integrale "Poren"-Volumen als Funktion des Radius bzw. der Rißweite, durch Differentiation dieser Kurve kann die (differentielle) Häufigkeitsverteilung der Porenradialen bzw. Rißweiten gewonnen werden.

### 3.2. Meßapparatur

Bei der Untersuchung inhomogener Materialien sind die zu erwartenden Streuungen naturgemäß abhängig vom Probenvolumen. Im hier vorliegenden Fall - Beton mit Größtkorn 16 mm und relativ geringer Dichte der belastungsinduzierten Risse - kamen die für Probenvolumina von wenigen  $\text{cm}^3$  ausgelegten käuflichen Meßapparaturen daher nicht in Betracht.

Eine im Institut vorhandene Apparatur wurde für dieses Forschungsvorhaben für Probengrößen  $70 \times 70 \times 10 \text{ mm}^3$  und einen Druckbereich von ca. 0,13 bar bis 8 bar umgerüstet und ergänzt, d.h. in einem Probenvolumen von ca.  $50 \text{ cm}^3$  können Rißweiten zwischen ca. 1 und  $60 \mu\text{m}$  erfaßt werden. Die Apparatur arbeitet vollständig automatisch, die Betätigung aller erforderlichen Ventile, Quecksilberdruck- und -pegelmeßeinrichtungen, Meßwerterfassung, Auswertung und Ergebnisdarstellung geschieht rechnergesteuert.

### 3.3. Probenherstellung

Insgesamt 25 Prismen aus Betonen der Rezepturen II und III wurden für Messungen der Rißverteilung mit Hilfe der Quecksilber-Porosimetrie vorbereitet. Die Prismen wurden paarweise langsam bzw. schnell bis zu jeweils gleichen Stauchungen am Druckrand zwischen  $1,96 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$  und  $3,86 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$  beansprucht, durch sorgfältige Einstellung der Exzentrizität ( $e = 16 \text{ mm}$ ) wurden Unterschiede in der Beanspruchung des lastfernen Randes gering gehalten.

Randstauchungen größer als  $3,86 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$  (bis  $5,82 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ ) konnten nur bei kurzzeitiger Belastung ohne Bruch erreicht werden. Die maximalen Beanspruchungen des lastfernen Randes traten als Zugdehnungen während der Entlastungsphase auf (als Folge der plastischen Verformungen am Druckrand und des inneren Spannungsgleichgewichts des Prüflings) und betrugen zwischen  $\max \epsilon_z = 0,02 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$  (bei  $\max |\epsilon_D| = 1,96 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ ) und  $\max \epsilon_z = 1,83 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$  (bei  $\max |\epsilon_D| = 5,82 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ ).

Aus der Mitte der Prismen wurde danach durch zwei Schnitte senkrecht zur Belastungsrichtung ein 70 mm hohes Stück herausgesägt und in (je nach Breite des verwendeten Diamant-Sägeblattes) 9 bis 11 ca. 10 mm dicke Scheiben senkrecht zur Richtung des Dehnungsgradienten zerteilt.

Durch diese feine Unterteilung der Biegedruckzone ist innerhalb jeder Einzelscheibe die räumliche Variation der Maximaldehnungen gering, damit wird eine relativ genaue Zuordnung von Rißvolumen und Dehnung möglich.

Nach sorgfältiger Trocknung im Vakuum wurden die Scheiben im Makroporosimeter untersucht, und zwar i.a. alle Scheiben eines Prismas.

An zahlreichen Scheiben wurden zuvor mit Hilfe eines Stereomikroskops bei 20- bis 50-facher Vergrößerung die oberflächlich sichtbaren Risse angezeichnet (vergl. Anlage 12). Dabei konnten die bekannten Beobachtungen über die Rißausbreitung in Beton bei steigender Beanspruchung - zunächst Rißbildung an den Grenzflächen Zuschlag - Zementstein, dann zunehmend Risse durch die Zementmatrix, vergl. /4, 5/ - bestätigt werden. Ebenso wurde der Zusammenhang zwischen der Dichte und Breite oberflächlich sichtbarer Risse und dem porosimetrisch bestimmten Rißvolumen qualitativ bestätigt.

Vorausgegangen waren umfangreiche Versuche zur Herstellung eines Betons mit möglichst wenig Verdichtungsstellen in dem hier untersuchten Rängenbereich sowie zur Entstehung zusätzlicher Risse beim Sägen und Trocknen. Weder durch gewollt unvorsichtiges Sägen noch durch Trocknung bei +105 °C konnten nachweisbare neue Risse erzeugt werden. Damit war gesichert, daß bei der sorgfältigen Behandlung des späteren Probenmaterials (Sägen mit geringem Andruck, Trocknung im Vakuum) tatsächlich nur belastungsinduzierte Risse gemessen wurden.

#### 4. Ergebnisse der Belastungsversuche

Bei der Auswertung wurden Prüflingsgruppen zusammengefaßt, um durch größere Prüflingszahlen die statistische Sicherheit der Aussagen zu erhöhen, sofern sie sich nur hinsichtlich solcher Versuchsparameter unterscheiden, die keinen nachweisbaren Einfluß auf die bezogene Festigkeit  $\alpha$  haben.

Bei der folgenden Darstellung der Ergebnisse werden die miteinander verglichenen Prüflingsgruppen angegeben (vergl. dazu den Prüfplan Anlage 5, Gruppenbezeichnung in Zeile 1).

##### 4.1. Festigkeitssteigerung nach schneller, hoher Vorbeanspruchung

Vergleich der Gruppen 7 + 8 + 21 + 22 + 24 (d.h. alle Prüfungen mit Exzentrizität  $e \approx 16 \text{ mm}$  und  $\sigma'_{sv} \geq 0,95$  an mindestens ca. 320 Tage alten Betonen) mit ihren jeweiligen unbeanspruchten Vergleichsgruppen (Zeile 27 in Anlage 5):

schnell, kurzzeitig und

hoch vorbeanspruchter Beton:

$$N = 35, \quad \bar{\alpha} = 1,079, \quad s_{\alpha} = 0,068$$

nicht vorbeanspruchter Beton:

$$N = 33, \quad \bar{\alpha} = 1,000 \text{ definitionsgemäß,} \\ s_{\alpha} = 0,077$$

Der Unterschied in  $\bar{\alpha}$  ist statistisch signifikant mit einer Sicherheit von mehr als 99,9 %, d.h. eine schnelle, kurzzeitige und hohe Vorbeanspruchung erhöht die Festigkeit der Biegedruckzone um ca. 8 %.

##### 4.2. Einflüsse auf die Festigkeit nach schneller Vorbeanspruchung

###### 4.2.1. Einfluß der Betonrezeptur

Vergleich der Gruppen 7 + 8 (Beton II), 21 + 22 (Beton III) und 24 (Beton IV):

Beton II :	N = 15,	$\bar{\alpha} = 1,082,$	$s_{\alpha} = 0,087$
Beton III :	N = 8,	$\bar{\alpha} = 1,088,$	$s_{\alpha} = 0,038$
Beton IV :	N = 12,	$\bar{\alpha} = 1,068,$	$s_{\alpha} = 0,060$

Die Unterschiede in  $\bar{\alpha}$  sind statistisch nicht signifikant.

#### 4.2.2. Einfluß des Betonalters

Vergleich der Gruppen 1 + 2 + 14 (Alter 50...100 Tage), 3 + 4 (Alter 100...200 Tage), 24 (ca. 320 Tage) und 7 + 8 + 21 + 22 (560...830 Tage):

Alter 50...100 Tage:	N = 9,	$\bar{\alpha} = 1,004,$	$s_{\alpha} = 0,053$
Alter 100...200 Tage:	N = 7,	$\bar{\alpha} = 1,046,$	$s_{\alpha} = 0,054$
Alter ca. 320 Tage:	N = 12,	$\bar{\alpha} = 1,068,$	$s_{\alpha} = 0,060$
Alter 560...830 Tage:	N = 23,	$\bar{\alpha} = 1,084,$	$s_{\alpha} = 0,072$

Die Unterschiede in  $\bar{\alpha}$  zwischen aufeinanderfolgenden Altersgruppen sind statistisch nicht signifikant, dagegen ist z.B. der Unterschied zwischen den jüngsten und den ältesten geprüften Betonen signifikant mit einer Sicherheit > 99 %. Die durch schnelle, hohe Vorbelastung erzielbare Festigkeitssteigerung der Biegedruckzone wächst demnach mit zunehmendem Betonalter.

#### 4.2.3. Einfluß der Lagerungsbedingungen vor der Prüfung

Vergleich der Gruppen 9 (Wasserlagerung), 11 (Trocknung bei +105 °C) und 13 (Temperaturwechsel):

Wasserlagerung :	N = 6,	$\bar{\alpha} = 0,993,$	$s_{\alpha} = 0,026$
Trocknung :	N = 3,	$\bar{\alpha} = 1,014,$	$s_{\alpha} = 0,038$
Temperaturwechsel :	N = 2,	$\bar{\alpha} = 0,989,$	$s_{\alpha} = 0,016$

Werden zur Vergrößerung der statistischen Basis auch die niedriger vorbeanspruchten Gruppen 10 (Trocknung) und 12 (Temperaturwechsel) hinzugenommen ergibt sich für

Wasserlagerung :	N = 6,	$\bar{\alpha} = 0,993,$	$s_{\alpha} = 0,026$
Trocknung :	N = 6,	$\bar{\alpha} = 1,020,$	$s_{\alpha} = 0,037$
Temperaturwechsel :	N = 3,	$\bar{\alpha} = 0,980,$	$s_{\alpha} = 0,019$

Die Unterschiede in  $\bar{\alpha}$  sind in keinem Falle statistisch signifikant. Dabei ist zu berücksichtigen, daß diese Prüfungen an jungem Beton erfolgt sind, für den nach Abschnitt 4.2.2. keine nennenswerte Festigkeitssteigerung durch schnelle Vorbeanspruchung zu erwarten ist.

Auch der Vergleich der im Klimaraum und im Labor gelagerten Prüfkörper (Alter 50...100 Tage: Gruppen 1 und 2, Alter 100...200 Tage: Gruppen 3 und 4) läßt keinen signifikanten Einfluß der Lagerungsart vor der Prüfung erkennen. Auf die Angabe der statistischen Kenngrößen wird verzichtet.

#### 4.2.4. Einfluß der Exzentrizität

Vergleich der Gruppen 18 ( $e = 8 \text{ mm}$ ), 21 + 22 ( $e = 16 \text{ mm}$ ) und 23 ( $e = 24 \text{ mm}$ ):

$e = 8 \text{ mm} :$	$N = 3,$	$\bar{\alpha} = 0,993,$	$s_{\alpha} = 0,101$
$e = 16 \text{ mm} :$	$N = 8,$	$\bar{\alpha} = 1,088,$	$s_{\alpha} = 0,038$
$e = 24 \text{ mm} :$	$N = 3,$	$\bar{\alpha} = 0,897,$	$s_{\alpha} = 0,042$

Statistisch signifikant ist der Unterschied zwischen den Exzentrizitäten 16 mm und 24 mm. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß sich die betreffenden Gruppen hinsichtlich der Vorbelastungshöhe so unterscheiden, daß die Festigkeitsunterschiede auch dadurch erklärt werden können.

#### 4.2.5. Einfluß der Lasthöhe bei schneller Vorbeanspruchung

In Anlage 8 ist für die Gruppen 5 + 6 + 7 + 8 + 19 + 20 + 21 + 22 + 24 (d.h. alle Prüfungen mit  $e \approx 16 \text{ mm}$  an mindestens 320 Tage alten Betonen) die erreichte bezogene Restfestigkeit  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Höhe der Vorbeanspruchung aufgetragen. Trotz großer Streuungen ist ein Einfluß von  $\sigma'_{SV}$  erkennbar derart, daß eine deutliche Festigkeitszunahme nur nach Vorbelastungen  $\geq 90 \%$  der mittleren langsamen Bruchspannung zu erwarten ist.

Für  $\sigma'_{SV} \geq 1,00$  ist eine systematische Abhängigkeit nicht mehr erkennbar.

Dieses Ergebnis hat dazu geführt, nach Möglichkeit nur Versuche mit  $\sigma'_{SV} \geq 0,95$  in die Auswertung des Einflusses der übrigen Parameter aufzunehmen.

#### 4.2.6. Einfluß der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit bei schneller Vorbeanspruchung

In Anlage 9 ist für die Gruppen 7 + 8 + 21 + 22 + 24 (d.h. alle Prüfungen mit  $e \approx 16 \text{ mm}$  und  $\sigma'_{SV} \geq 0,95$  an mindestens 320 Tage alten Betonen) die bezogene Restfestigkeit  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit bei schneller Vorbeanspruchung aufgetragen. Die Streuungen sind groß, für einen Einfluß von  $\dot{\sigma}_{SV}$  auf  $\alpha$  gibt es keine Anzeichen.

Eine statistische Analyse der o.a. Gruppen bestätigt diese Aussage:

$\dot{\sigma}_{SV} = 30 \dots 230 \text{ N/mm}^2 \text{ s}$	$N = 8,$	$\bar{\alpha} = 1,075,$	$s_{\alpha} = 0,088$
$\dot{\sigma}_{SV} = 370 \dots 1.000 \text{ N/mm}^2 \text{ s}$	$N = 13,$	$\bar{\alpha} = 1,083,$	$s_{\alpha} = 0,068$
$\dot{\sigma}_{SV} = 1.100 \dots 2.400 \text{ N/mm}^2 \text{ s}$	$N = 14,$	$\bar{\alpha} = 1,077,$	$s_{\alpha} = 0,061$

Die Unterschiede in  $\bar{\alpha}$  sind statistisch nicht signifikant.

#### 4.2.7. Einfluß der Lagerungsbedingungen zwischen schneller Vorbelastung und Restfestigkeitsbestimmung

Vergleich der Gruppen 14 + 1 + 2 (5 Minuten Lagerung im Labor), 15 (7 Tage Wasserlagerung) und 16 + 17 (7 Tage Trocknung bei  $+105^{\circ}\text{C}$ ):

5 Minuten Labor	:	$N = 9,$	$\bar{\alpha} = 1,004,$	$s_{\alpha} = 0,053$
7 Tage Wasserlagerung:		$N = 3,$	$\bar{\alpha} = 0,985,$	$s_{\alpha} = 0,055$
7 Tage Trocknung	:	$N = 3,$	$\bar{\alpha} = 0,973,$	$s_{\alpha} = 0,067$

Die Unterschiede in  $\bar{\alpha}$  sind in keinem Fall statistisch signifikant. Dabei ist zu berücksichtigen, daß diese Prüfungen an jungem Beton erfolgt sind, für den nach Abschnitt 4.2.2. keine nennenswerte Festigkeitssteigerung durch schnelle Vorbeanspruchung zu erwarten ist.

#### 4.3. Poisson-Zahl, Volumenänderung

Bei den meisten der unterschiedlich hoch vorbeanspruchten Prismen der Gruppen 5, 6, 7 und 8 sowie den nicht vorbeanspruchten Prismen der Vergleichsgruppe wurde auch die Beton-Querdehnung an Zug- und Druckrand gemessen.

Die (dem Betrage nach sehr kleinen) Querdehnungen am Zugrand streuen stark, die aus ihnen errechneten Poisson-Zahlen sind nach Größenordnung und Verlauf unbrauchbar.

Die aus Längs- und Querdehnung am Druckrand berechneten Poisson-Zahlen zeigen bei niedrigen Beanspruchungen immer reversibles Verhalten. Bei hohen Beanspruchungen treten starke Irreversibilitäten derart auf, daß bei der Entlastung  $\mu$  auf relativ hohe Werte ( $> 0,5$ ) ansteigt, siehe Anlage 10.

Der Übergangsbereich, in dem die Poisson-Zahl bei einem Teil der Prüflinge noch reversibel, bei anderen schon irreversibel verläuft, ist recht breit (maximale Biegedruckspannung ca. 50...110 % der mittleren statischen Festigkeit, maximale Randstauchung ca. 1...2 ‰). Damit ist eine genaue Zuordnung beginnender Irreversibilitäten von  $\mu$  zu einem bestimmten Stadium der Rißentstehung oder -aufweitung nicht möglich.

Unterschiede zwischen schneller und langsamer Belastung im Verlauf der Poisson-Zahl und der Volumenänderung in Abhängigkeit von Spannung oder Längsdehnung wurden nicht festgestellt.

#### 4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse der Belastungsversuche

Durch eine kurzzeitige, hohe ( $\geq 95$  % der statischen Bruchspannung) Vorbelastung konnte die Biegedruckfestigkeit von ca. 1...3 Jahre altem Beton um ca. 8 % erhöht werden, bei jüngerem Beton und/oder geringerer Vorbeanspruchung ist die zu erwartende Festigkeitssteigerung geringer. Die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit bei der Vorbelastung sowie die Betonrezeptur/-festigkeit sind innerhalb der hier untersuchten Grenzen ohne Einfluß.

Eine Abhängigkeit von der Größe der Exzentrizität konnte nicht nachgewiesen werden, allerdings waren die für diese Untersuchungen verwendeten Prüflinge zu jung, um überhaupt eine deutliche Festigkeitszunahme zu zeigen.

Auch die Lagerungsbedingungen vor bzw. nach der schnellen Vorbelastung sind ohne signifikanten Einfluß. Insbesondere führt eine dreiwöchige Trocknung des Betons bei  $+105^{\circ}\text{C}$  offensichtlich nicht zum gleichen Ergebnis wie eine längere Lagerung unter normalen Klimabedingungen, der Wasserhaushalt des Betons scheint also für die Festigkeitssteigerung nicht maßgeblich zu sein.

Die Unterschiede im Verformungsverhalten (Dehnungen, Poisson-Zahl, Volumenänderung) sonst vergleichbarer Prüflinge sind groß, Abhängigkeiten von der Belastungsgeschwindigkeit wurden nicht festgestellt.

Ein unmittelbarer Vergleich der Ergebnisse des jetzt abgeschlossenen und des vorangegangenen Forschungsvorhabens ist nur in einigen Punkten möglich. Die damals festgestellte Unabhängigkeit der Festigkeitssteigerung von der Betonrezeptur wurde bestätigt, der Variationsbereich des Betonalters war seinerzeit zu gering, um Abhängigkeiten erkennen zu lassen.

Die quantitativen Unterschiede in der Festigkeitssteigerung - hier  $8\% \pm 7\%$  bei auf  $\sigma'_{SV} = 0,95 \dots 1,23$  begrenzter Vorbelastungshöhe, früher  $14\% \pm 8\%$  bei im Mittel deutlich höherer Vorbelastung - zeigen, daß auch im Bereich  $\sigma'_{SV} > 1,0$  die Festigkeit mit  $\sigma'_{SV}$  zunimmt, allerdings bei steigender Ausfallquote.

Zusammenfassend wird festgestellt, daß eine schnelle, hohe und kurzzeitige Vorbelastung die Tragfähigkeit der Biegedruckzone erhöht. Das Maß der Erhöhung ist abhängig von der Vorbelastungshöhe und damit der Ausfallquote. In den beiden bisher durchgeführten Forschungsvorhaben wurden bei Ausfallquoten von  $10\%$  bzw.  $41\%$  Festigkeitssteigerungen von  $8\%$  bzw.  $14\%$  ermittelt. Dieser Effekt kann nicht durch bevorzugten Ausfall von Prüflingen im unteren Bereich der Festigkeitsverteilung erklärt werden.



## 5. Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen

### 5.1. Mikroskopische Rißfeststellung

Das verwendete Stereomikroskop erlaubte bei maximal 50-facher Vergrößerung die Feststellung von Rissen ab ca. 1 - 2  $\mu\text{m}$  Breite. Ein großer Teil der für die Porosimetrie-Messungen hergestellten Proben (vergl. Abschnitt 3.3.) wurde zuvor nach sichtbaren Rissen abgesucht.

In Übereinstimmung mit z.B. /4/ wurden bis zu Betonstauchungen von ca. 1,8 ‰ nur Risse an der Grenzfläche Zuschlag - Zementstein gefunden, und zwar bevorzugt am Rand relativ großer Zuschlagkörner. Bei größeren Betonstauchungen fanden sich in zunehmender Zahl auch Risse durch die Zementmatrix, meist als Verbindung zweier benachbarter Abrisse von Zuschlagkörnern. Betonstauchungen über etwa 4 ‰ führen bereichsweise zu starken Gefügezerstörungen mit Rißweiten über 10  $\mu\text{m}$  und dichtem Rißmuster, am Rand der aus Betonblöcken herausgesägten Prismen auch zum Ausbrechen von Zuschlagkörnern. 3 Beispiele von Mikrofotografien unterschiedlich hoch beanspruchten Betons siehe in Anlage 11.

Durch Anzeichnen aller auf einer Scheibe gefundenen Risse kann die Gefügeveränderung qualitativ beurteilt werden. Anlage 12 zeigt 5 von 11 fortlaufend nummerierten Scheiben aus einem Prisma, das schnell bis zu Randdehnungen von  $\max \epsilon_z = 1,83 \text{ ‰}$  (am lastfernen Rand, Scheibe 299/1) bzw.  $\max |\epsilon_D| = 5,19 \text{ ‰}$  (am Druckrand, Scheibe 299/11) beansprucht worden war. Am oberen Rand von 299/1 ist deutlich ein horizontal durchlaufender Zugriß sichtbar, auch die übrigen kurzen Risse sind vorwiegend horizontal orientiert. Auf 299/2 ist der Zugriß noch über mehr als 1/3 der Prismenbreite durchgehend, auf 299/3 als Häufung kurzer horizontaler Einzelrisse an Kornrändern erkennbar, im übrigen nimmt die Rißdichte mit der Entfernung vom Zugrand ab. Die hoch druckbeanspruchten Scheiben 299/10 und 299/11 zeigen die zum Druckrand hin wieder zunehmende Rißdichte sowie das Zusammenwachsen einzelner Risse an Kornrändern zu einem auch die Matrix durchsetzenden, vorwiegend vertikal orientierten Rißsystem.

## 5.2. Ergebnisse der Quecksilber-Porosimetrie

### 5.2.1. Integrale und differentielle Porenverteilung

Der an das Makroporosimeter angeschlossene Rechner bereitet die Meßwerte jeweils einer Betonscheibe - ca. 300 Datenpaare von Druck und Eindringmenge des Quecksilbers - selbsttätig auf zu Darstellungen des integralen und differentiellen "Poren"-Volumens als Funktion des Porenradius bzw. der Rißweite.

Beispielhaft zeigt Anlage 13, Blatt 1 bis 7, solche Darstellungen für 7 von 11 Scheiben aus dem schon in Abschnitt 5.1. und Anlage 12 angeführten, schnell und hoch beanspruchten Prisma. Die unter der Annahme linearer Dehnungsverteilung errechneten maximalen Dehnungen in der Mittelebene einer jeden Scheibe sind in der Anlage angegeben.

Ein Vergleich der 7 Blätter der Anlage 13 untereinander ergibt:

- Die Scheiben 1 und 3 aus der Umgebung des lastfernen Randes sind im wesentlichen auf Zug beansprucht worden (während der Entlastungsphase, vergl. Abschnitt 3.3.), die Scheiben 5 und 7 repräsentieren den insgesamt am geringsten beanspruchten Bereich der Prismenmitte, die Scheiben 9, 10 und 11 haben nur Druckstauchungen zunehmender Größe erfahren.
- Das integrale "Poren"-Volumen, z.B. bis zu einem Mindestradius von 1  $\mu\text{m}$ , ist in der Prismenmitte am geringsten und steigt zum lastfernen Rand, besonders aber zum Druckrand deutlich an.
- Das differentielle Porenvolumen der Scheibe 5 verläuft im wesentlichen monoton mit steilem Anstieg für  $R \lesssim 2 \mu\text{m}$ . Wie aus den Voruntersuchungen - auch mit einem Mikroporosimeter mit Meßbereich ca. 5  $\mu\text{m}$ ... 0,005  $\mu\text{m}$  - bekannt ist, handelt es sich hierbei um den Ausläufer des natürlichen Porensystems unbeanspruchten Betons mit einem Maximum des differentiellen Porenvolumens bei  $R = 0,07 \dots 0,1 \mu\text{m}$ . Demgegenüber zeigen die übrigen Scheiben mehr oder weniger ausgeprägte Spitzen im Verlauf des differentiellen Volumens, die nach Abschnitt 5.1. und Anlage 12 zweifellos als Risse zu interpretieren sind.

- Erwartungsgemäß nehmen die Rißweiten zu den Prismenrändern hin - also in Richtung zunehmender Dehnung bzw. Stauchung - zu: von 5  $\mu\text{m}$  in Scheibe 3 auf 9  $\mu\text{m}$  in Scheibe 1 bzw. von 1,4  $\mu\text{m}$  in Scheibe 7 über 3 und 6  $\mu\text{m}$  in Scheibe 10 bis auf 30  $\mu\text{m}$  am Druckrand (Scheibe 11). Auch diese Zahlenwerte stimmen mit den Ergebnissen mikroskopischer Rißweitenmessung innerhalb deren Genauigkeitsgrenzen überein.

### 5.2.2. Dehnungsabhängigkeit des Rißvolumens

Der Umfang der durch die Quecksilber-Makroporosimetrie vermittelten Informationen über die Schädigung des Betongefüges macht eine Vereinfachung erforderlich. Es lag nahe, das integrale Rißvolumen als Funktion der Betondehnung (maximal erreichter Wert z.B. in der Mittelebene der Scheibe) darzustellen, dabei ist jedoch zunächst noch offen, über welchen Rißweitenbereich das Integral zweckmäßigerweise erstreckt werden sollte. Das Beispiel von Anlage 13, Blatt 7 zeigt, daß Rißweiten  $\gtrsim 30 \mu\text{m}$  durchaus auftreten können, die von der Apparatur vorgegebene obere Grenze von 60  $\mu\text{m}$  erscheint also sinnvoll. Die in Anlage 13, Blatt 3 dargestellte Porenverteilung gering geschädigten Betons läßt dagegen die Möglichkeit erkennen, daß belastungsinduzierte Rißvolumina bei Rißweiten von einigen  $\mu\text{m}$  durch den steilen Anstieg des natürlichen Porenvolumens überdeckt werden, wenn auch die apparativ vorgegebene untere Grenze von ca. 1  $\mu\text{m}$  als Integrationsgrenze übernommen wird. Eine Auftragung des Rißvolumens zwischen 60  $\mu\text{m}$  und verschiedenen Untergrenzen zwischen 20  $\mu\text{m}$  und 1  $\mu\text{m}$  als Funktion der Dehnung für das bereits aus den Anlagen 12 und 13 bekannte Beispiel bestätigt diese Vermutung, siehe Anlage 14: Der Variationsbereich des Rißvolumens ist bei Integration bis 1 oder 2  $\mu\text{m}$  deutlich eingeschränkt, dagegen kann eine zu hoch gewählte Untergrenze (20  $\mu\text{m}$ ) Unterschiede im mittleren Beanspruchungsbereich nivellieren. Als günstigster Kompromiß erschien eine Integration des Rißvolumens zwischen den Grenzen 5  $\mu\text{m}$  und 60  $\mu\text{m}$ . Alle Porosimetermessungen wurden so ausgewertet und die Ergebnisse in den Anlagen 15 und 16 für die Betonrezepturen II bzw. III in Abhängigkeit von der Betondehnung dargestellt. Man erkennt:

- Das Riß- bzw. Porenvolumen in gering beanspruchten Bereichen ist bei der Rezeptur III knapp doppelt so groß wie bei der Rezeptur II. Die Vorversuche haben gezeigt, daß es sich hierbei im wesentlichen um den Einfluß unterschiedlicher Verdichtung (Beton II: Innen- und Außenrüttler, Beton III: Rütteltisch) handelt.

- Bei Beton II wurden bei langsamer und schneller Belastung insgesamt größere Stauchungen erreicht als bei Beton III.
- In beiden Fällen können bei schneller Belastung deutlich größere Verformungen ohne Bruch des Prüflings erreicht werden als bei langsamer Belastung.
- Innerhalb dieser Grenzen zeigt schnell bzw. langsam belasteter Beton keine Unterschiede im Rißvolumen.
- Die durch Quecksilber-Makroporosimetrie nachweisbare Gefügauflockerung beginnt bei Dehnungen  $\gtrsim 0 \dots 0,3 \text{ } ^\circ/\text{oo}$  bzw. bei Stauchungen  $\gtrsim 3 \dots 3,5 \text{ } ^\circ/\text{oo}$ .

### 5.3. Zusammenfassung der Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen

Die Quecksilber-Makroporosimetrie innerhalb des Rißweitenbereichs von ca. 1  $\mu\text{m}$  bis 60  $\mu\text{m}$  ist zur quantitativen Untersuchung von belastungsbedingten Schädigungen des Betongefüges sehr gut geeignet. Durch Änderung insbesondere der unteren Rißweitengrenze ist ggf. eine Anpassung an spezielle Problemstellungen möglich.

Einflüsse der Belastungsgeschwindigkeit auf das Rißvolumen konnten insoweit nachgewiesen werden, als bei schneller, kurzzeitiger Belastung deutlich größere Verformungen - und damit größere Rißvolumina - ohne Bruch des Prüflings erreicht werden können als bei langsamer Belastung.

Braunschweig, den 28. April 1983  
Pm/br

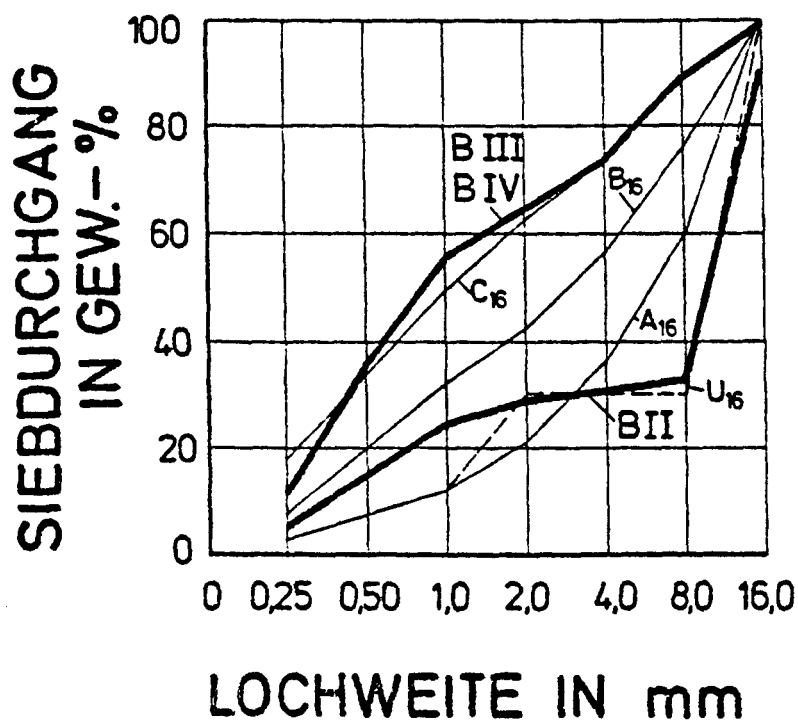
## Literatur

- /1/ Paulmann, K., Steinert, J.  
Verhalten von Beton bei sehr kurzer Belastungs-  
geschichte  
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben  
B I 7 - 81 07 05 - 264 (1980)
  
- /2/ Rüsç, H.  
Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone  
DAfStb Heft 120 (1955)
  
- /3/ Rüsç, H., Kordina, K., Stöckl, S.  
Festigkeit der Biegedruckzone  
Vergleich von Prismen- und Balkenversuchen  
DAfStb Heft 190 (1967)
  
- /4/ Hsu, T.T.C., Slate, F.O., Sturman, G.M., Winter, G.  
Microcracking of plain concrete and the shape of  
the stress-strain curve  
Journal ACI, 2/1963, S. 209 - 224
  
- /5/ Slate, F.O., Olsefski, S.  
X-rays for study of internal structure and  
microcracking of concrete  
Journal ACI, 5/1963, S. 575 - 588

# Anlage 1: Betonrezepturen

			Beton II <sup>+) </sup>	Beton III <sup>+) </sup>	Beton IV
Mischungsbestandteile:					
Zement PZ 35 F	kg/m <sup>3</sup>		269	330	314
Zuschlag	kg/m <sup>3</sup>		1937	1725	1868
Wasser	kg/m <sup>3</sup>		195	231	188
W/Z			0,72	0,70	0,60
Sieblinie			U <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>
Zusatzmittel			-	-	BV
Dosierung	% vom Zementgew.		-	-	1,5
Frischbetoneigenschaften:					
Ausbreitmaß	mm		385	430	405
Verdichtungsmaß			1,12	1,09	1,07
Rohdichte	kg/dm <sup>3</sup>		2,40	2,29	2,37
Eigenschaften nach 28 Tagen:					
Rohdichte	kg/dm <sup>3</sup>		2,35...2,37	2,22...2,28	2,34
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>		36...42	33...40	58

<sup>+)</sup>  Diese Rezepturen sind praktisch identisch mit den in /1/ unter der gleichen Bezeichnung verwendeten.



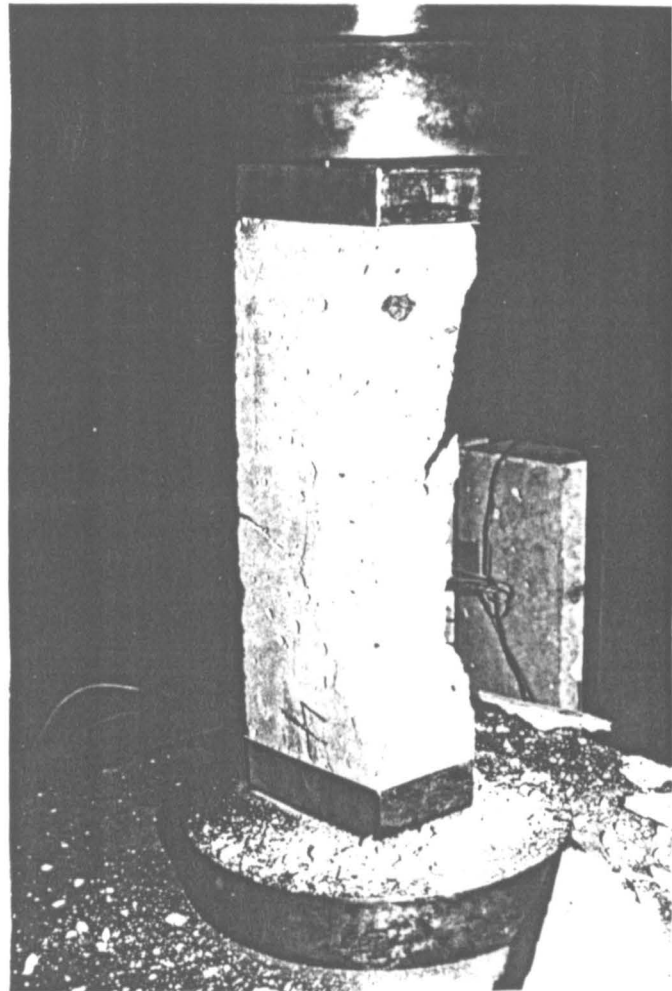
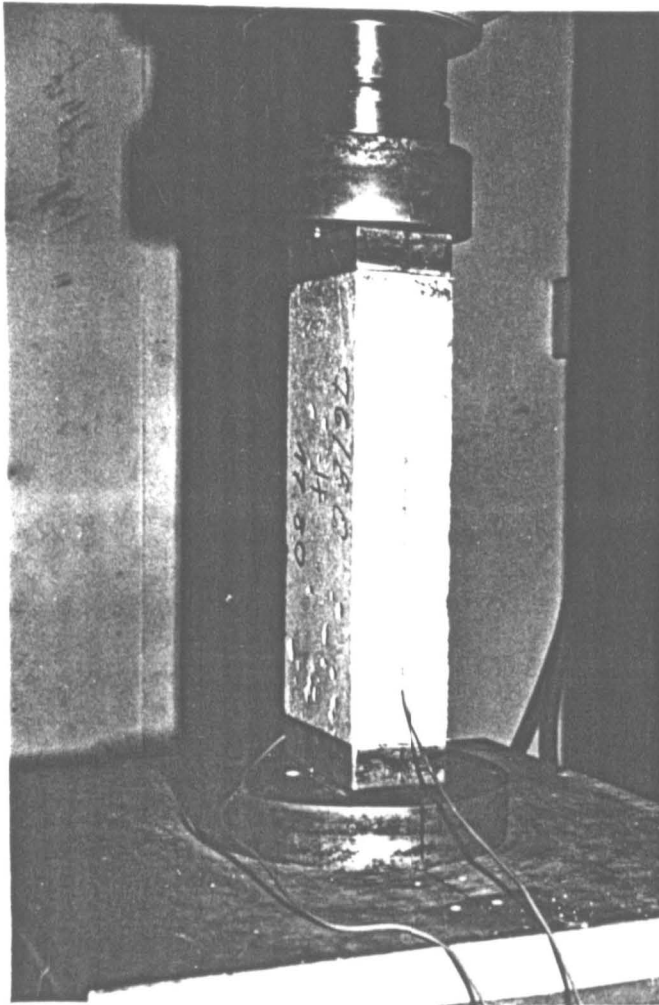
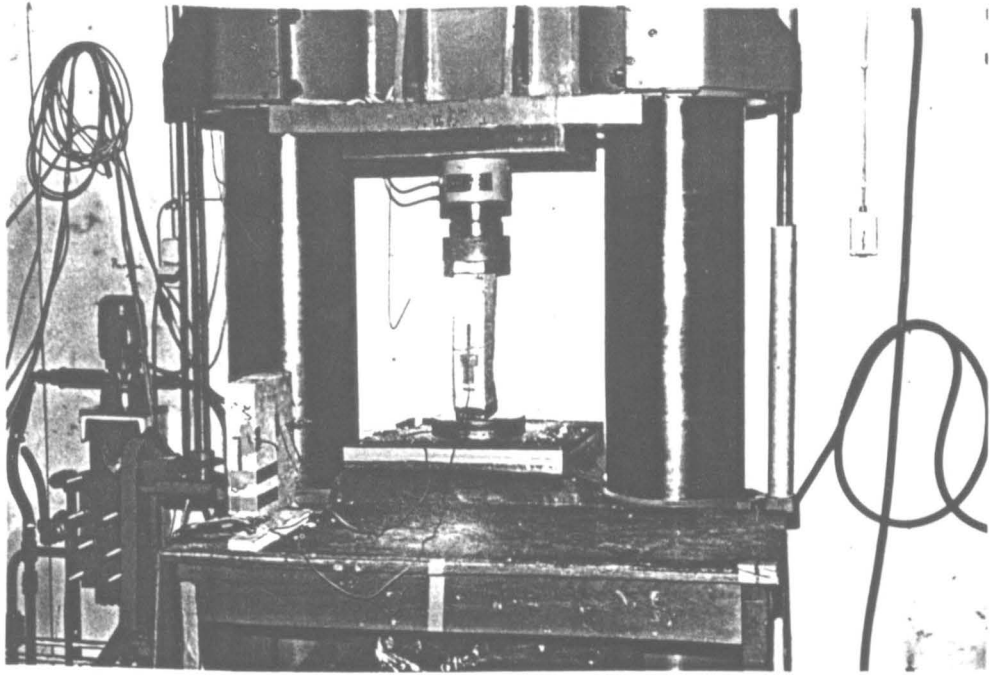
## Anlage 2: Probenherstellung

Betonage:	<p>anfangs pro Mischerfüllung 36 Prismen 70 x 120 x 300 mm<sup>3</sup> in Einzelschalungen,</p> <p>später pro Mischerfüllung 6 Blöcke 360 x 160 x 500 mm, aus denen je 6 Prismen 70 x 120 x 300 mm<sup>3</sup> herausgesägt wurden (zur Verminderung der Festigkeitsstreuungen),</p> <p>kleinste Abmessung der Prismen größer als vierfacher Größtkorn-Durchmesser entsprechend DIN 1048</p>
Verdichtung:	Rütteltisch (Einzelschalungen) bzw. Innen- und Außenrüttler (Blöcke)
Lagerung:	siehe Anlage 6
Druckflächen:	planparallel geschliffen
Dehnmeßstreifen:	<p>pro Prisma zwei DMS mit Meßlänge 60 mm, nach Abschleifen der Zementschlämme mittig auf den Schmalseiten appliziert, ggf. zur Querdehnungs- messung zwei DMS mit Meßlänge 30 mm auf den Schmalseiten ca. 35 mm oberhalb der Mitte.</p> <p>In Vorversuchen an einem mit insgesamt 40 Dehn- meßstreifen versehenen Prisma war nachgewiesen worden, daß die ausmittige Lage dieser Meßstel- len keinen systematischen Einfluß auf die Meß- werte hat.</p> <p>Bei den für Wasserlagerung und Trocknung bei hohen Temperaturen vorgesehenen Prismen konnten keine Dehnmeßstreifen appliziert werden.</p>

### Anlage 3: Versuchseinrichtung

Prüfmaschine:	servohydraulisch geregelt, Fabrikat SCHENCK, Höchstkraft 630 kN, Kolbenhub 100 mm, Ventildurchfluß 1600 l/min
Ankopplung der Prüflinge:	Lastverteilungsplatten aus Stahl, 30 mm dick, beidseitig geschliffen und gehärtet, Zwischen- lagen aus Zeichenkarton.  Linienlager ca. 4 mm breit (anfangs Al Mg Si 1, nach jedem Versuch erneuert, später Stahl zur Erzielung höherer Belastungsgeschwindigkeiten) parallel zur Schmalseite der Prismen zur Ein- stellung der Last Exzentrizität. Bei der am häufigsten verwendeten Exzentrizität $e = 16...18 \text{ mm}$ , $e/d = 0,13...0,15$ , wird die reine Biegedruckbeanspruchung (lastferner Rand spannungsfrei) am besten nachgebildet.  Kugelkalotte über dem oberen Linienlager.
Meßgrößen:	Kolbenkraft  Betondehnungen an zwei gegenüberliegenden Schmal- seiten
Meßgeräte:	Trägerfrequenz-Meßbrücken 5 kHz
Meßwert-Erfassung:	Rechnergesteuerte Anlage, praktisch gleichzei- tige Abfrage aller Meßgeräte mit einer Taktzeit von min. 1 ms, AD-Wandler mit 12 bit (entspre- chend etwa $0,5 \text{ }^{\circ}/\infty$ ) Auflösung, Datenspeicherung auf Diskette, Anschluß an das institutseigene Rechenzentrum zur Weiterverarbeitung der Meß- daten.





Servohydraulische Belastungseinrichtung (oben) sowie ein eingebautes Betonprisma vor und nach der exzentrischen Druckbelastung (unten). Man erkennt die zur ausmittigen Lastenleitung verwendeten Metallstreifen, den Ausbruch eines sichelförmigen Teiles der Biegedruckzone sowie einen klaffenden Zugriß.

1	Versuchsparameter	Gruppenbezeichnung																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
2	+ : keine Dehnungsmessung	+ + + + + +																								
3	Betonrezeptur II	78								83																18
4	III																									
5	IV																									
6	Prüfalter 30... 50 Tage	15	16			47				12	36							35						18		
7	50...100 Tage																									
8	100...200 Tage																									
9	ca.320 Tage																									
10	560...830 Tage																									
11	Lagerung Wasser	10	5	5	11	47				12	12			18				35						18		
12	Klimaraum 20/65																									
13	vor Labor																									
14	+105 °C																									
15	Prüfung Temperaturwechsel																									
16	Exzentrizität e = 8 mm	10	5	5	11	47				12	12	6	18				6	23				6	18			
17	e ≈ 16 mm																									
18	e = 24 mm																									
19	Vorbelastungs- höhe	4	2	2	5	18		15		6	3	3	1	2	3	3	1	2	3	2		8		3	12	
20	$\sigma'_{SV} = 0,30...0,94$ $\sigma'_{SV} \geq 0,95$																									
21	Spannungsanstiegs- geschwindigkeit bei	4	2	2	5	15	3	8	7	6	3	3	1	2	3	3	1	2	3	1	1	6	2	3	12	
22	$\dot{\sigma}_{SV} = 30... 230 \text{ N/mm}^2\text{s}$ 370...1000																									
23	Vorbelastung = 1100...2400																									
24	Lagerung 5 min Labor	4	2	2	5	15	3	8	7	6	3	3	1	2	3	3	1	2	3	1	1	6	2	3	12	
25	zwischen 7 Tage Wasser																									
26	SV und LR 7 Tage + 60 °C																									
27	Zahl der unbeanspruchten Vergleichsproben	6	3	3	6	14				6	6		3		3	3	3		3	13				3	6	

Zusammenstellung der Versuchsparameter mit Variationsbereich und zugehörigen Prüflingszahlen

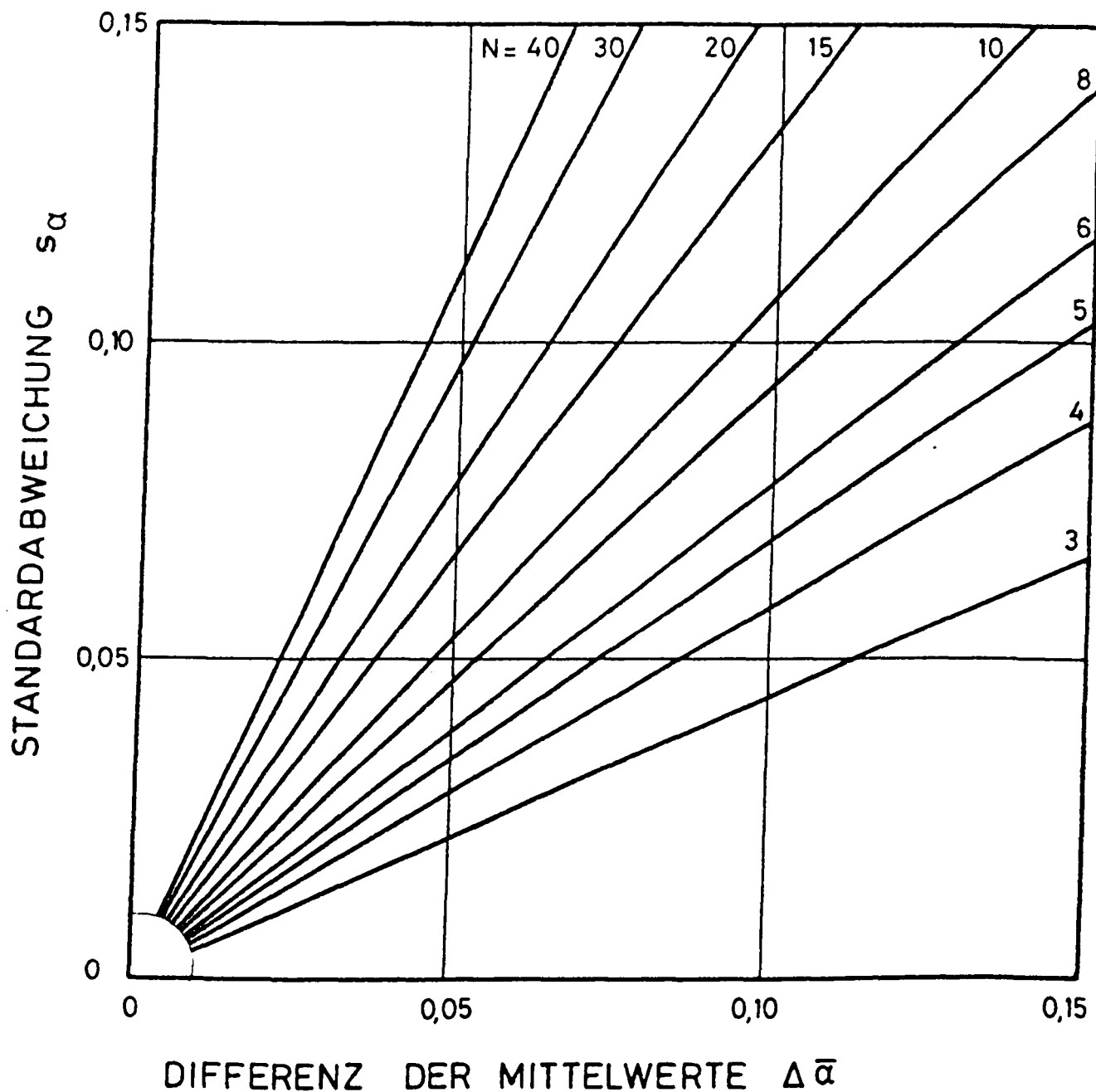
## Anlage 6: Lagerungsbedingungen

Die in Anlage 5 stichwortartig angegebenen Lagerungsbedingungen werden, soweit erforderlich, wie folgt erläutert:

Labor: Ab ca. 4 Wochen nach der Betonage Lagerung in einem Kellerraum (= Prüfraum) mit annähernd konstanter Lufttemperatur von 20 °C (nach der Betonage in jedem Falle zunächst Lagerung unter feuchten Tüchern, dann im Klimaraum bei 20 °C/65 % rel. Feuchte).

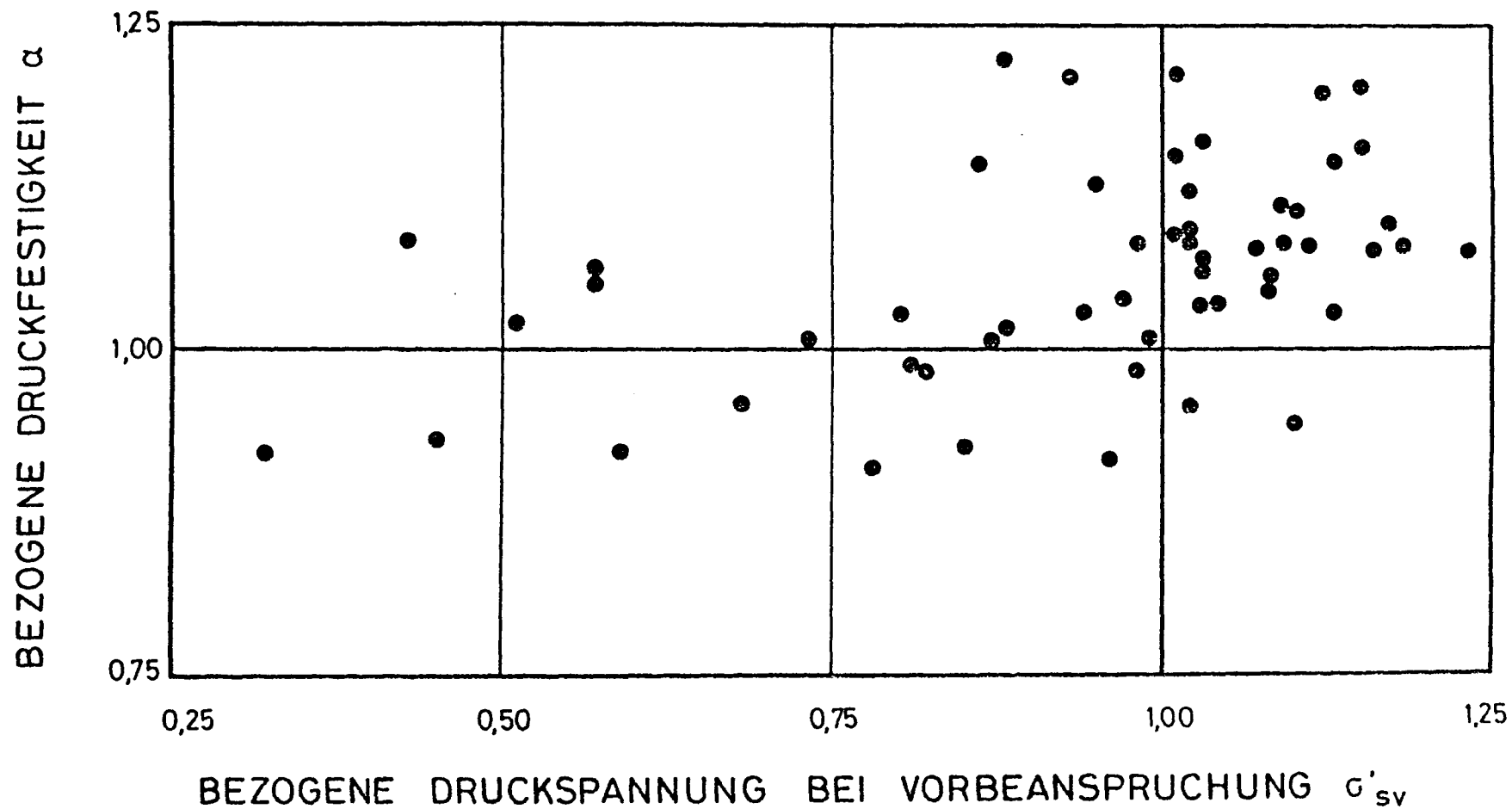
+105 °C : Lagerung bis 4 Wochen nach der Betonage unter feuchten Tüchern und im Klimaraum, danach ca. 3 Wochen im Trockenschrank, Aufheizen auf +105 °C und Abkühlen auf Raumtemperatur langsam innerhalb je 4 Tagen. Prüfung unmittelbar anschließend.

Temperaturwechsel: Lagerung zunächst wie bei +105 °C (s.o.), dann im Trockenschrank schnell auf 160 °C aufgeheizt, Temperatur 20 Stunden gehalten, dann schnell auf -10 °C abgekühlt. Nach 3 Stunden Erwärmung auf Raumtemperatur, anschließend Prüfung.



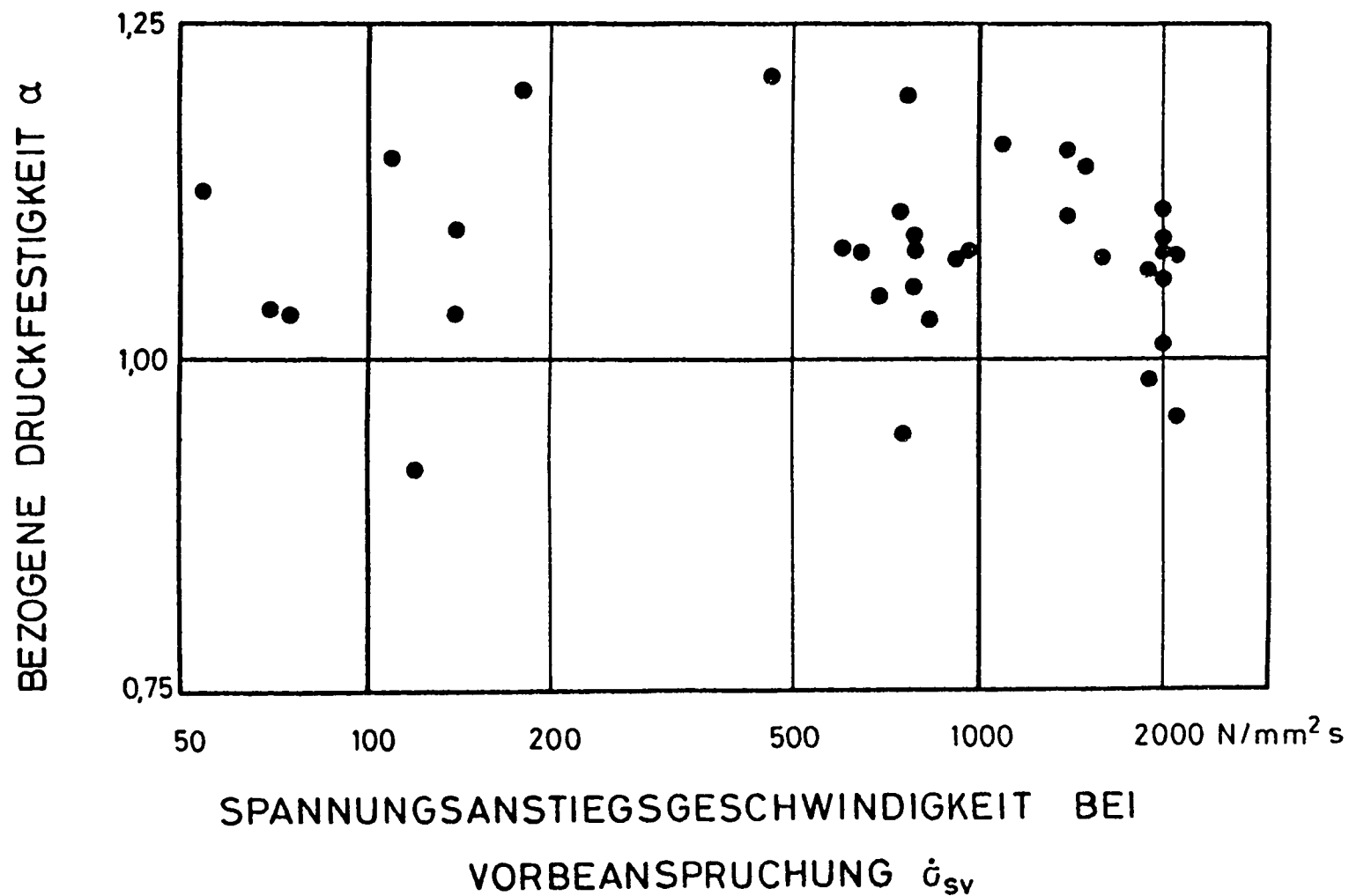
Maximale Standardabweichung  $s_\alpha$  zweier Stichproben des Umfanges  $N$  für den Nachweis einer signifikanten (95 % Sicherheit) Festigkeitssteigerung um einen Betrag  $\Delta \bar{\alpha}$  (Vergleichsgruppe  $\bar{\alpha} = 1,000$ )

Beispiel: Für  $s_\alpha = 0,05$  ist ein  $\Delta \bar{\alpha} = 0,05$  signifikant, wenn beide Stichproben mindestens 9 Werte umfassen.

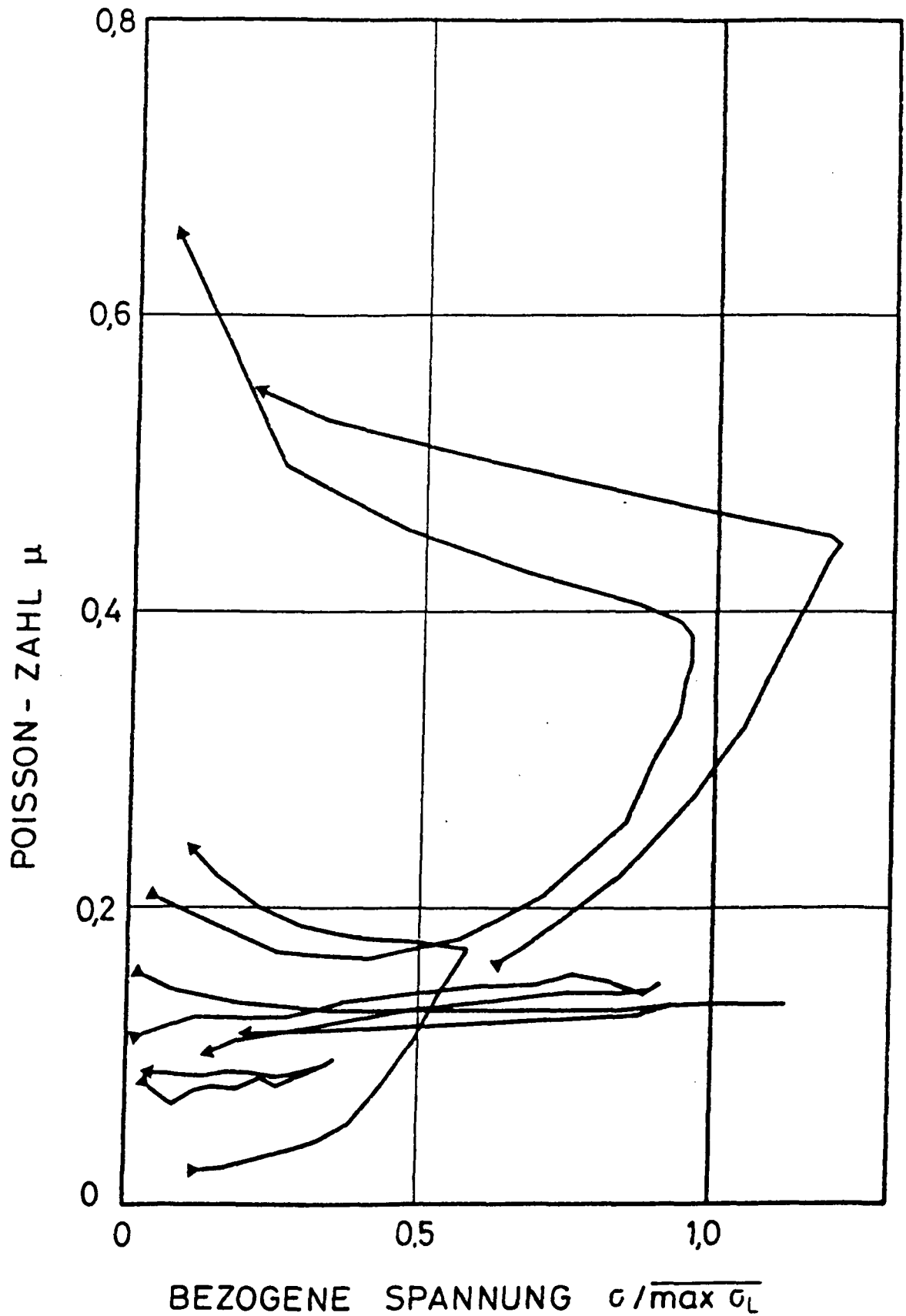


Einfluß der Höhe einer schnell aufgebrachten, kurzzeitigen Vorbeanspruchung auf die bezogene Biegedruckfestigkeit



(ausmittige Belastung mit  $e \approx 16$  mm, Betonalter mindestens 320 Tage)

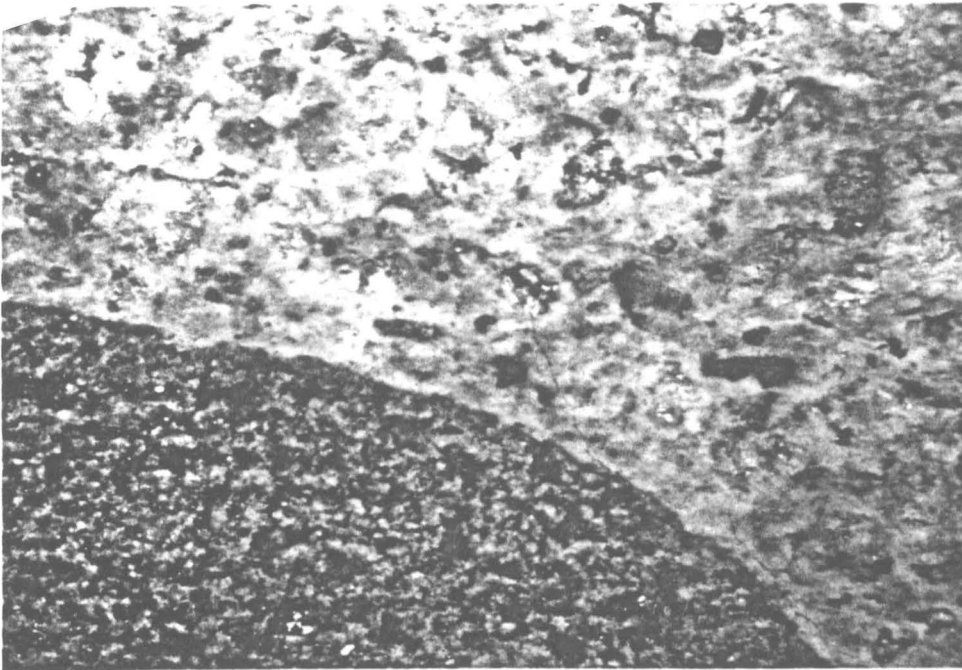


Einfluß der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit bei kurzzeitiger Vorbeanspruchung  
auf die bezogene Biegedruckfestigkeit  
(Vorbelastungshöhe  $\sigma'_{sv} \geq 0,95$ ,  $e \approx 16$  mm, Betonalter mindestens 320 Tage)

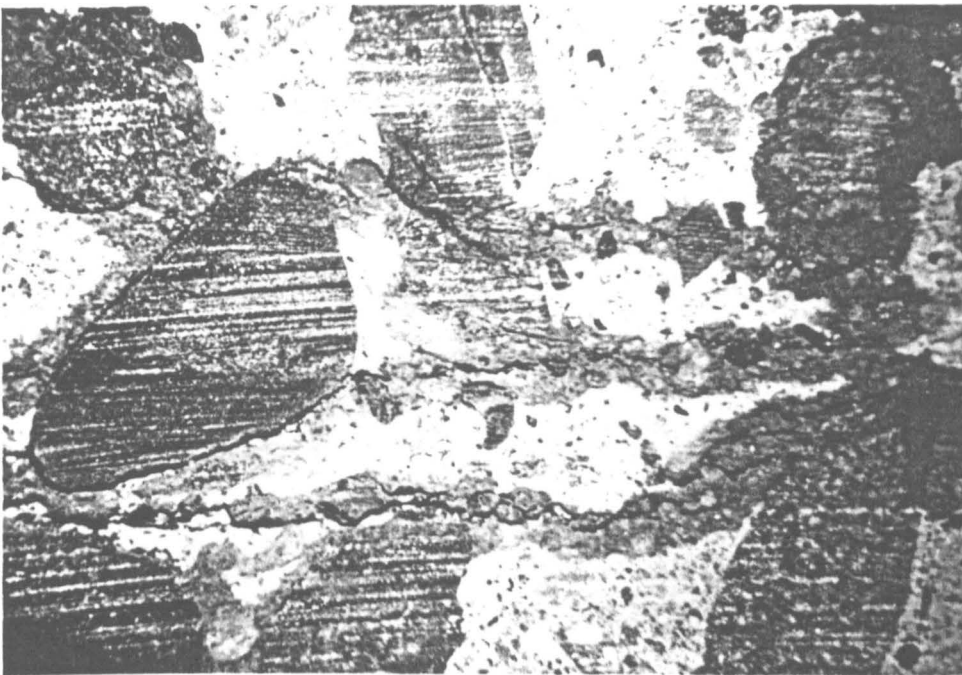


Beispiele für reversiblen bzw. irreversiblen Verlauf der Poisson-Zahl am Druckrand als Funktion der bezogenen Biegedruckspannung

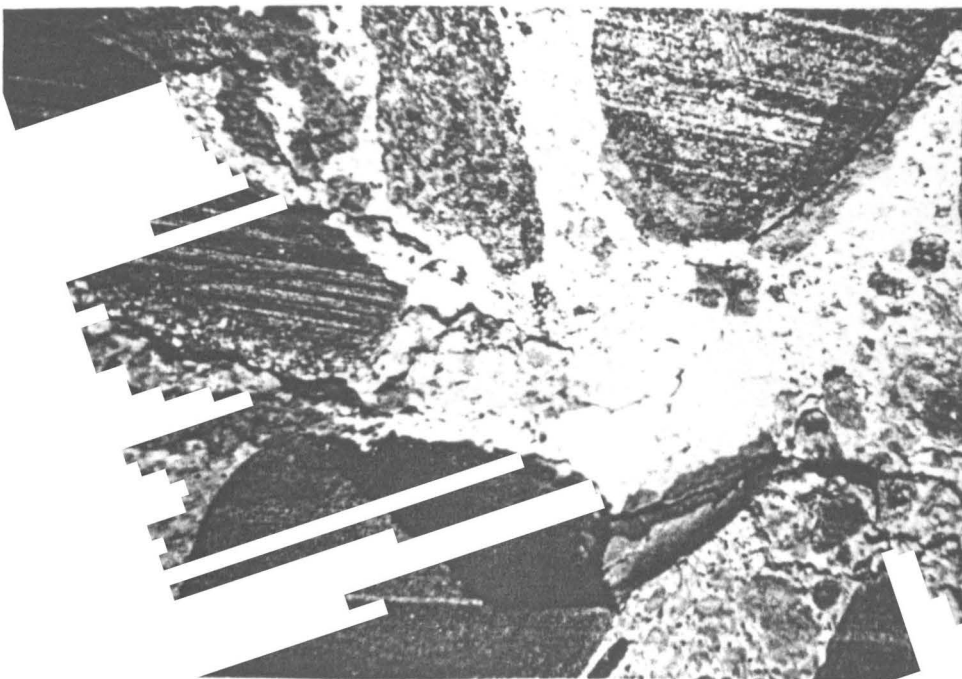
 Belastung  
 Entlastung



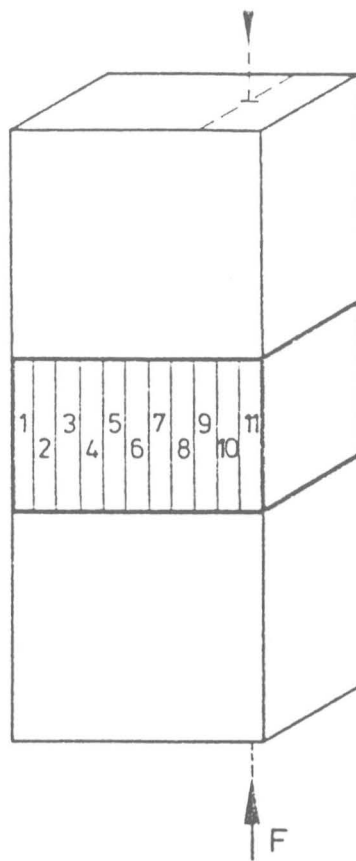
Riß am Rand  
Zuschlagkor.  
nender Riß d.  
Zementmatrix,  
Betonstauchung  
ca. 1,8 ‰,  
Vergrößerung 32-



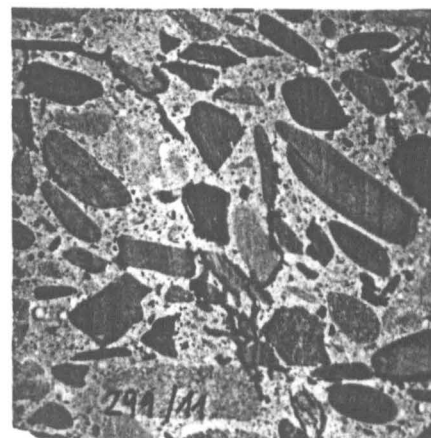
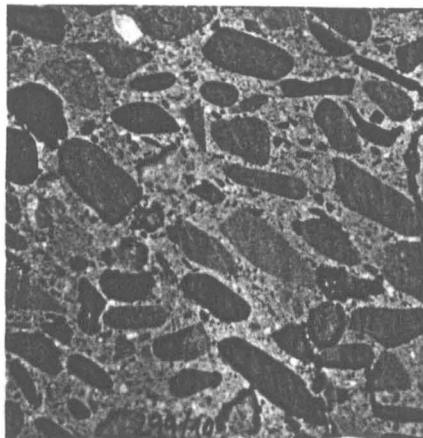
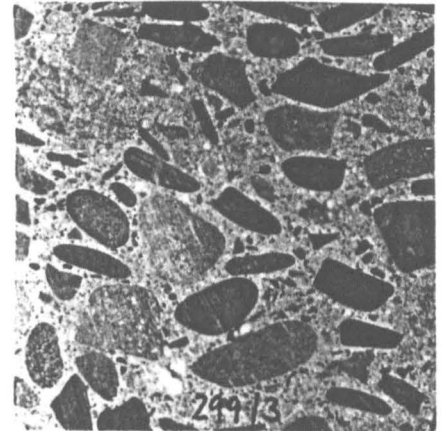
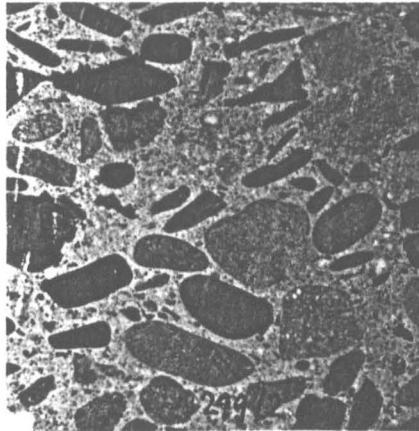
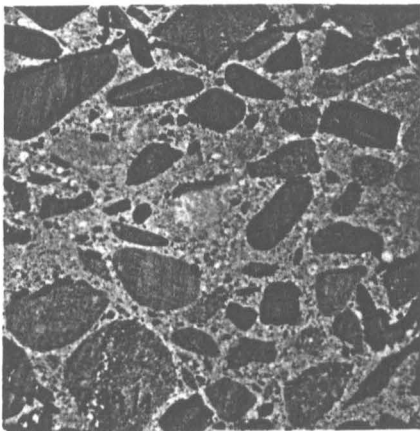
Starke Gefügeschädi-  
gungen bei Beton-  
stauchungen von  
ca. 4,6 ‰ (Mitte)  
bzw.  
ca. 5,2 ‰ (unten)  
Vergrößerung 8-fach



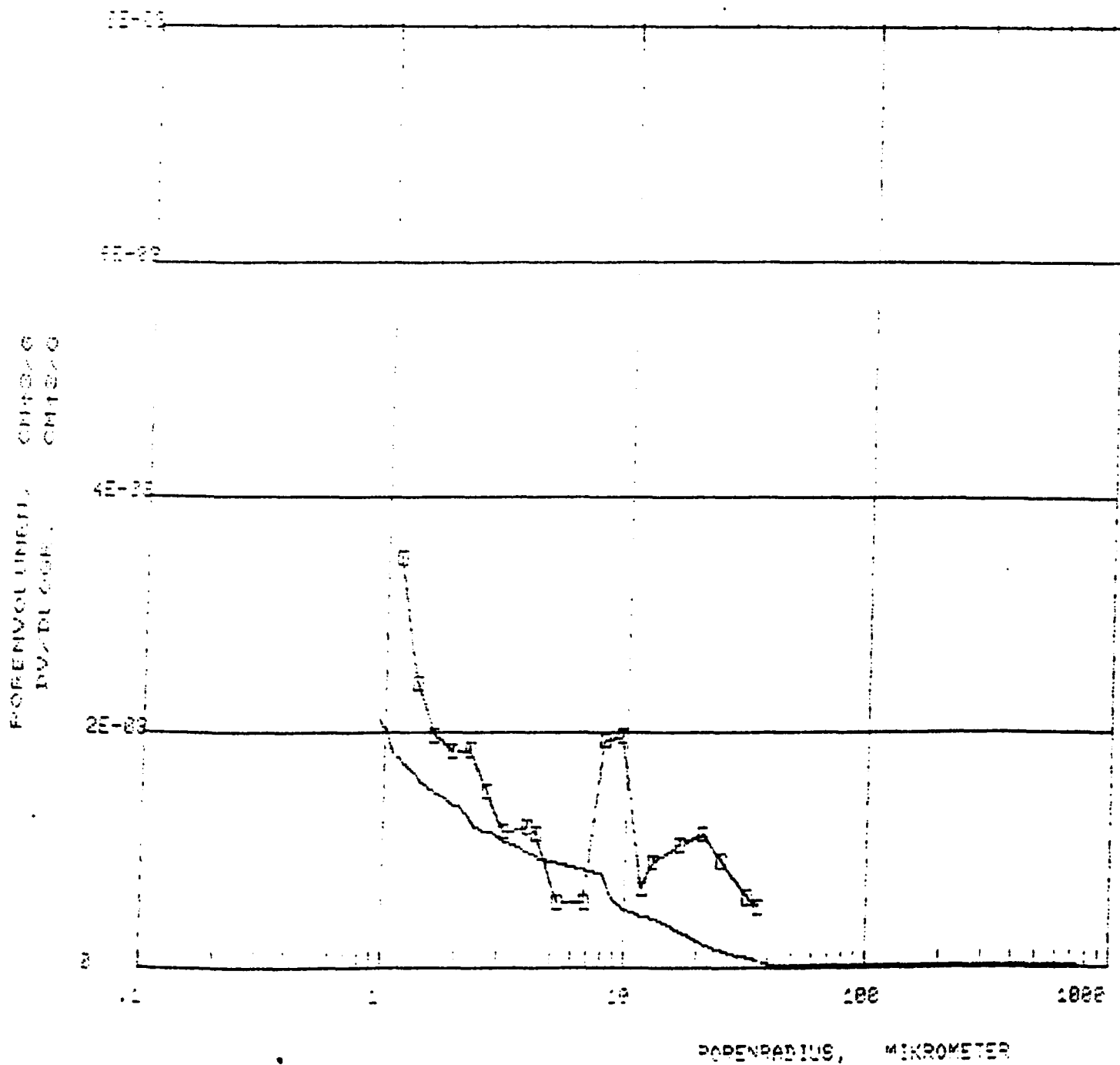




Lage der Proben  
für die Quecksilber-  
Porosimetrie



Risse (angezeichnet) auf unterschiedlich hoch auf Zug (299/1...3) bzw. auf Druck (299/10, 11) beanspruchten, scheibenförmigen Proben für die Quecksilberporosimetrie



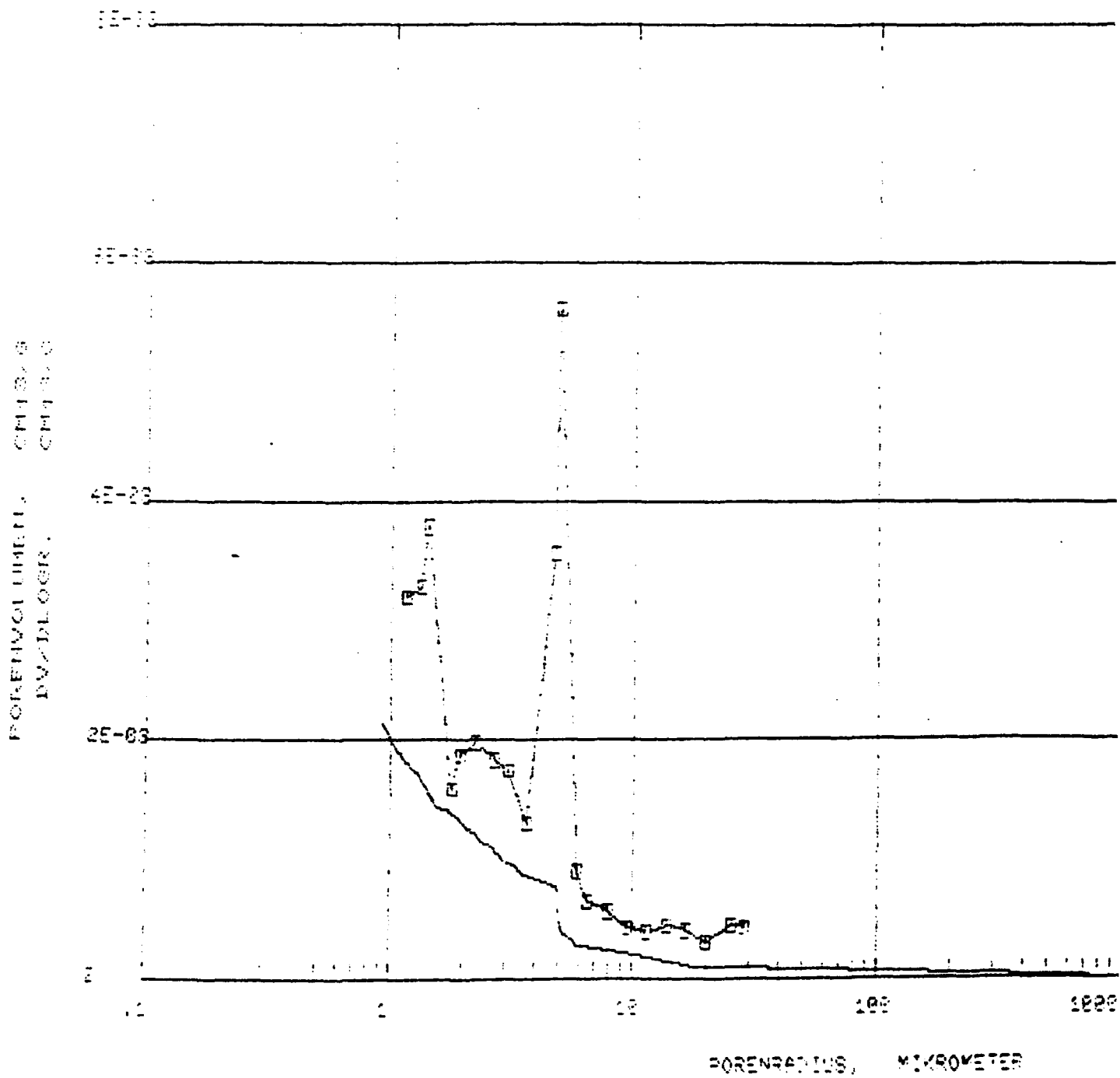
Poren- und Rißvolumen als Funktion des Porenradius bzw. der Rißweite

- integrales Volumen
- differentielles Volumen

Scheibe 1 (lastferner Rand):

Abstand Mittelebene - lastferner Rand 5 mm

Dehnung in Mittelebene  $\max \epsilon_z = 1,70 \text{ } ^\circ/\infty$ ,  $\max |\epsilon_D| = 0,05 \text{ } ^\circ/\infty$



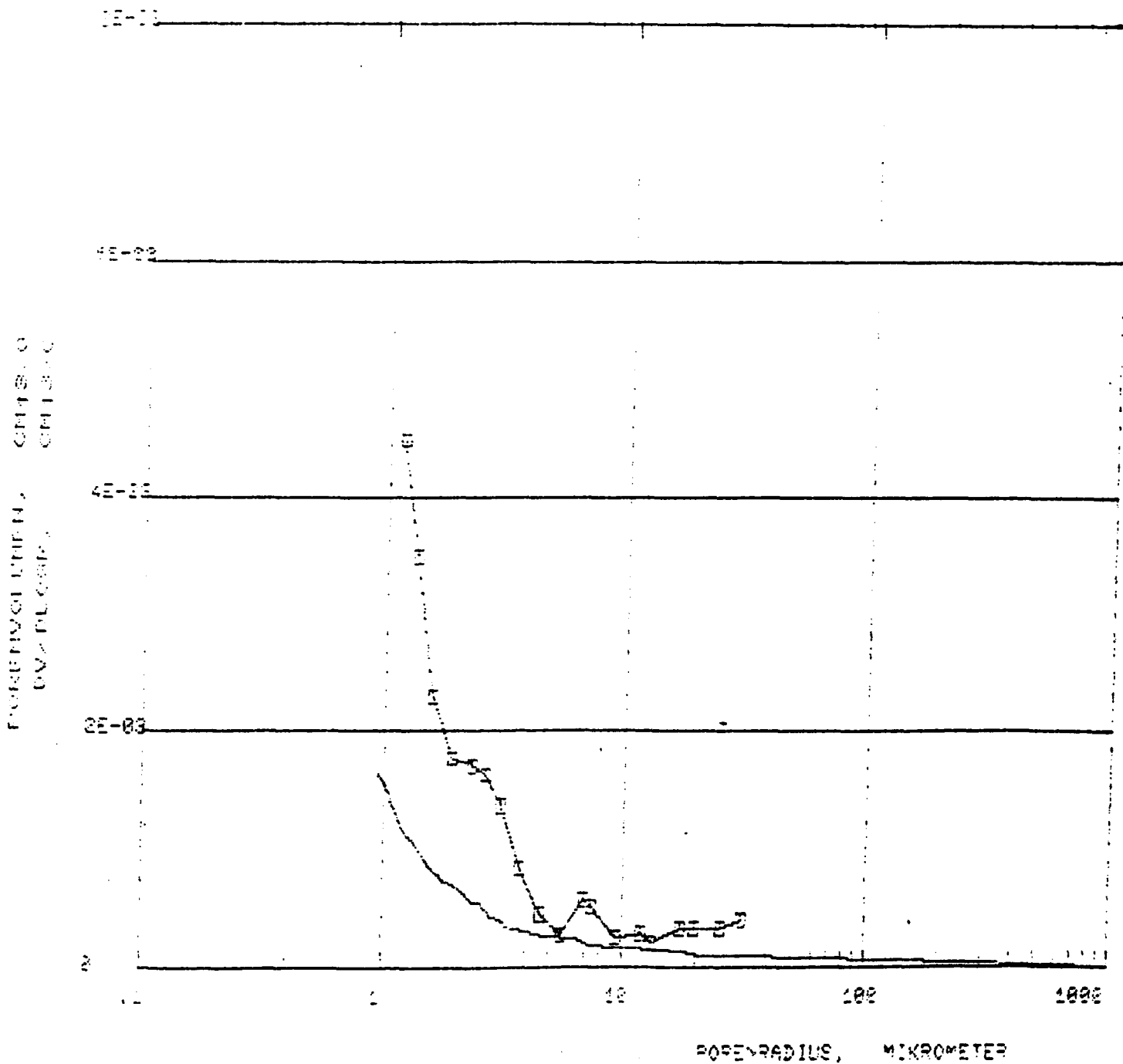
Poren- und Rißvolumen als Funktion des Porenradius bzw. der Rißweite

- integrales Volumen
- differentielles Volumen

Scheibe 3:

Abstand Mittelebene - lastferner Rand 27 mm

Dehnung in Mittelebene  $\max \epsilon_z = 1,10 \text{ } ^\circ/\infty$ ,  $\max |\epsilon_D| = 0,75 \text{ } ^\circ/\infty$



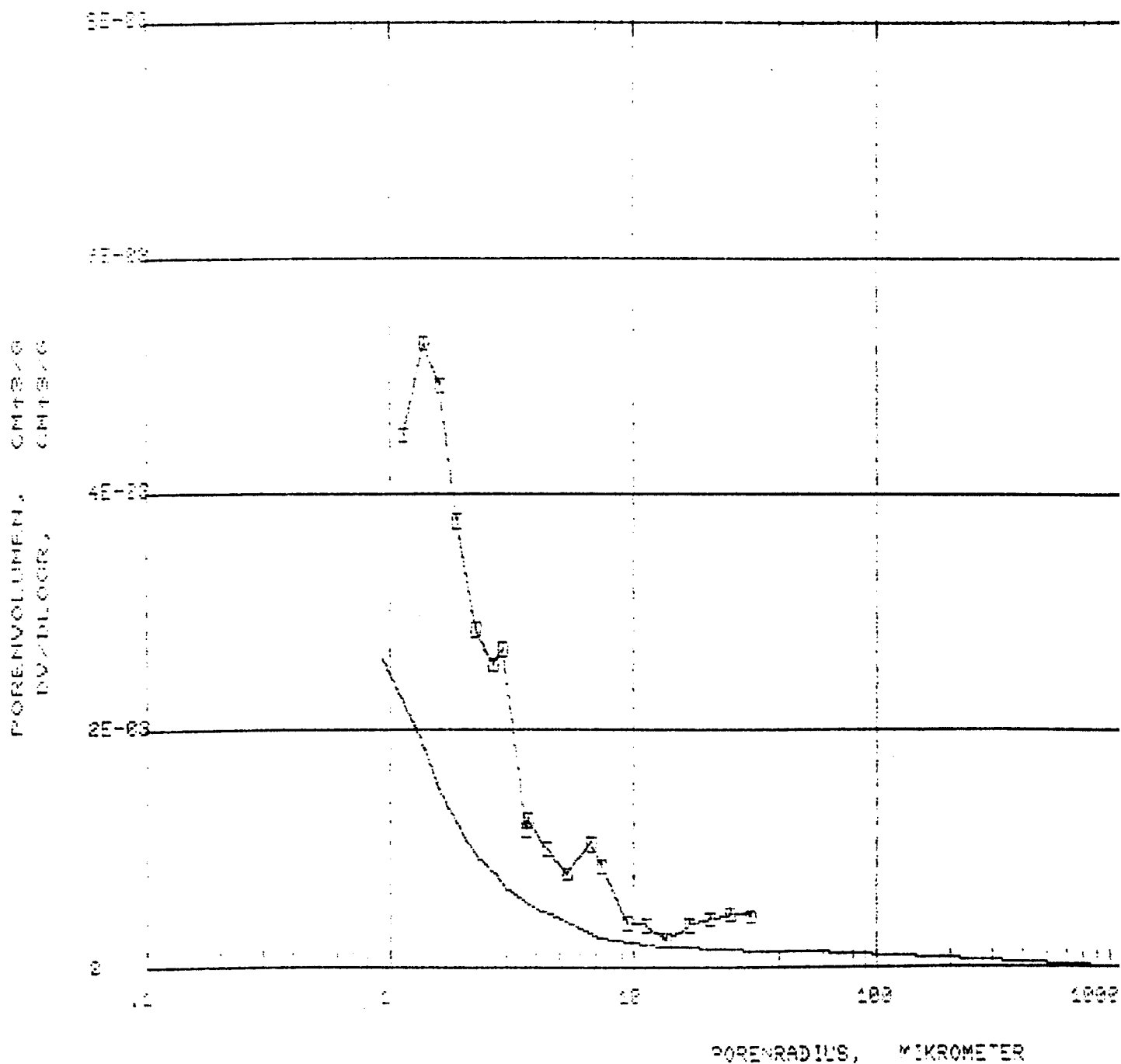
Poren- und Rißvolumen als Funktion des Porenradius bzw. der Rißweite

- integrales Volumen
- differentielles Volumen

Scheibe 5:

Abstand Mittelebene - lastferner Rand 49 mm

Dehnung in Mittelebene  $\max \epsilon_z = 0,50 \text{ } ^\circ/\infty$ ,  $\max |\epsilon_D| = 1,80 \text{ } ^\circ/\infty$



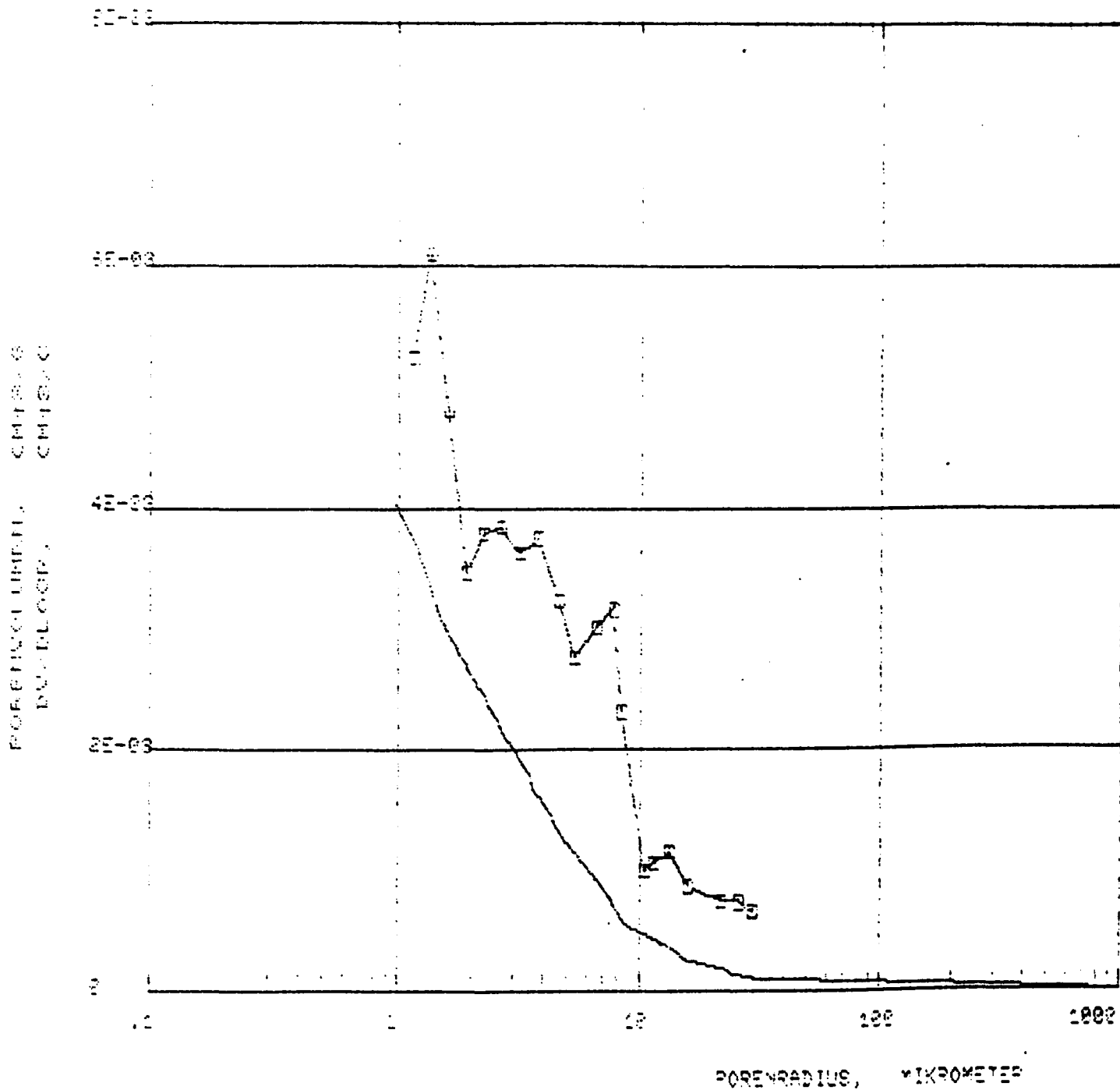
Poren- und Rißvolumen als Funktion des Porenradius bzw. der Rißweite

— integrales Volumen  
—□— differentielles Volumen

Scheibe 7:

Abstand Mittelebene - lastferner Rand 71 mm

Dehnung in Mittelebene  $\max \epsilon_z \approx 0$ ,  $\max |\epsilon_D| = 2,85 \text{ ‰}$



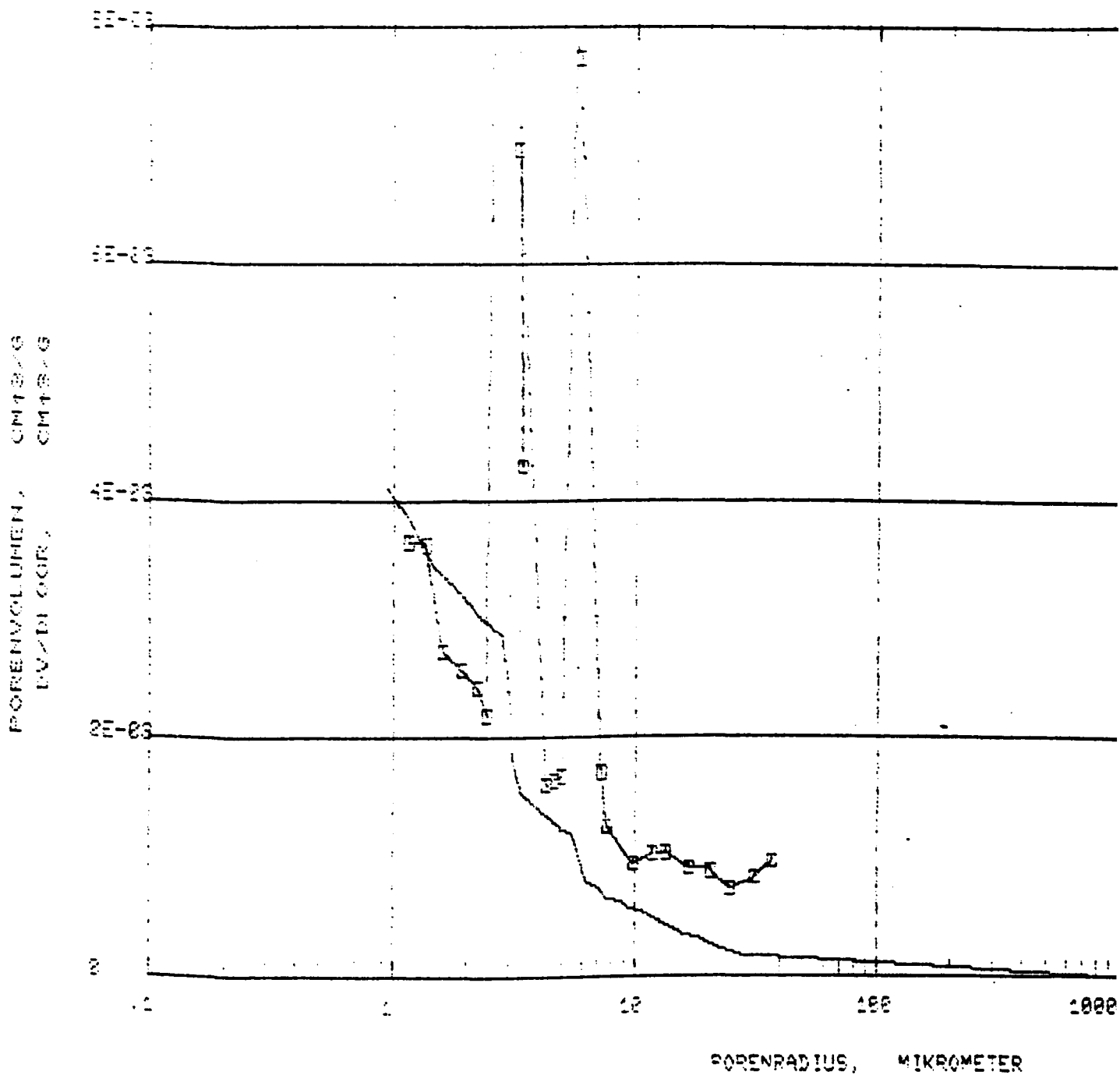
Poren- und Rißvolumen als Funktion des Porenradius bzw. der Rißweite

- integrales Volumen
- differentielles Volumen

Scheibe 9:

Abstand Mittelebene - lastferner Rand 93 mm

Dehnung in Mittelebene  $\max \epsilon_z = 0$ ,  $\max |\epsilon_D| = 3,90 \text{ } ^\circ/\infty$



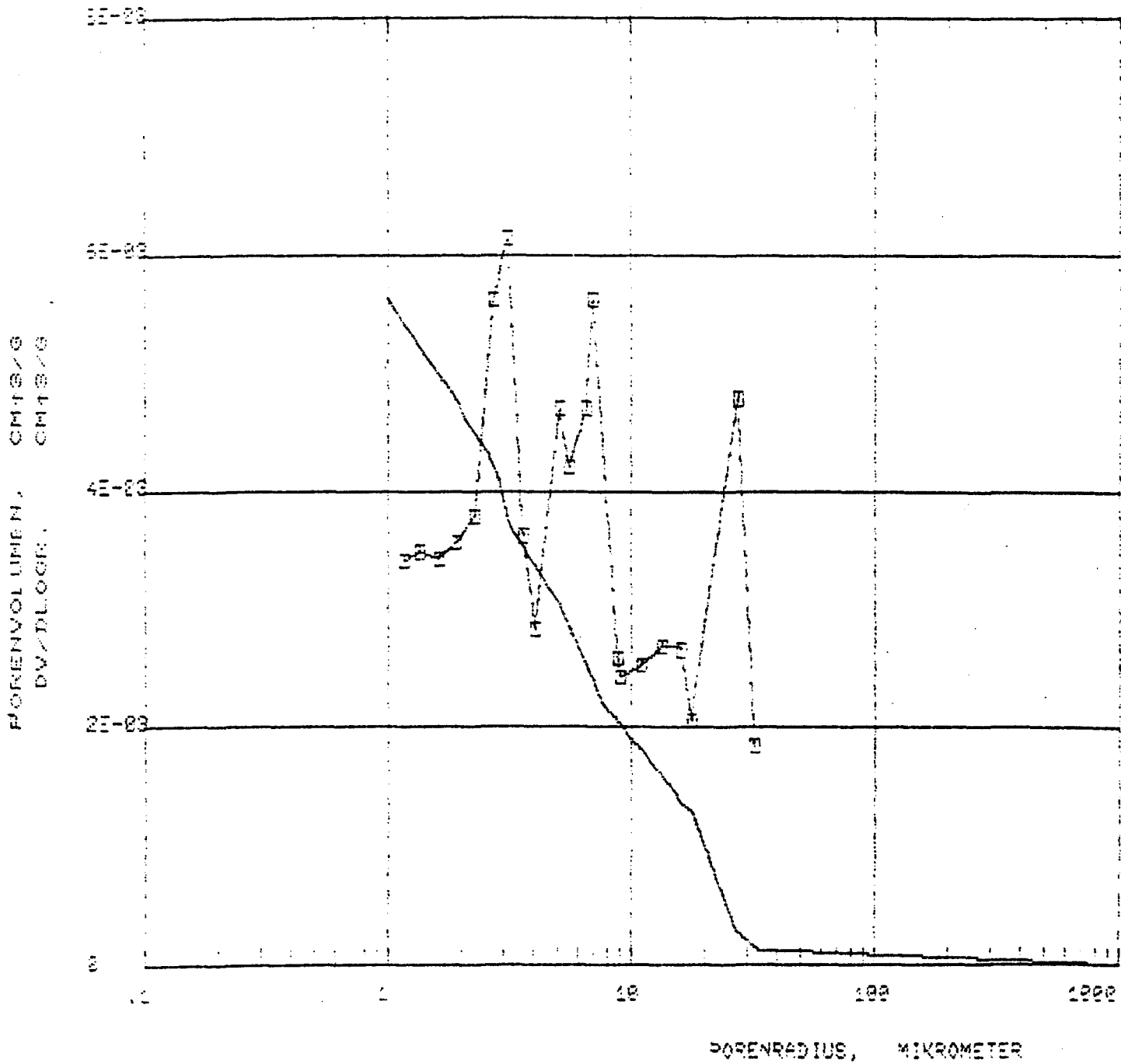
Poren- und Rißvolumen als Funktion des Porenradius bzw. der Rißweite

- integrales Volumen
- differentielles Volumen

Scheibe 10:

Abstand Mittelebene - lastferner Rand 104 mm

Dehnung in Mittelebene  $\max \epsilon_z = 0$ ,  $\max |\epsilon_D| = 4,40 \text{ ‰}$



Poren- und Rißvolumen als Funktion des Porenradius bzw. der Rißweite

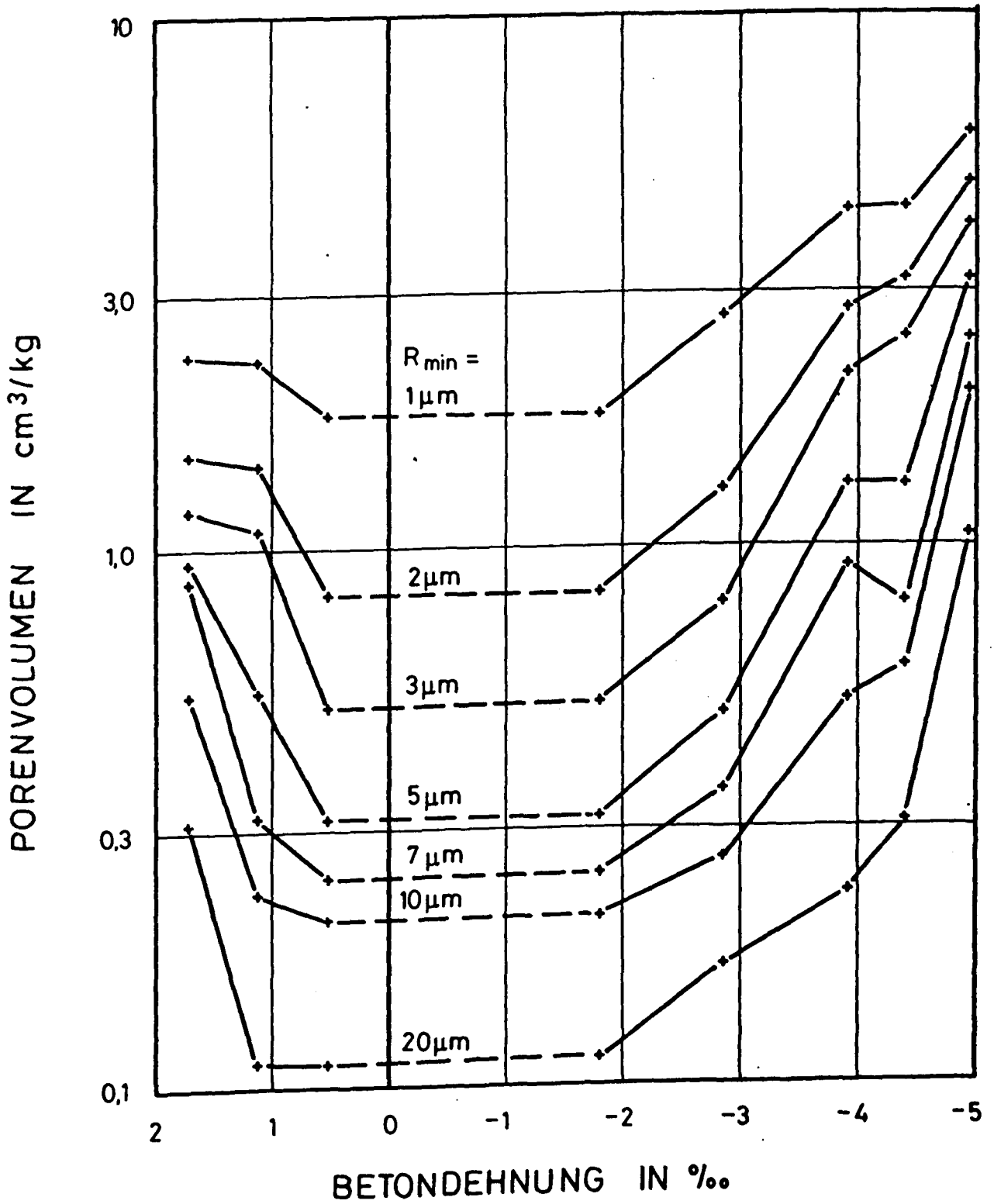
- integrales Volumen
- differentielles Volumen

Scheibe 11 (Druckrand):

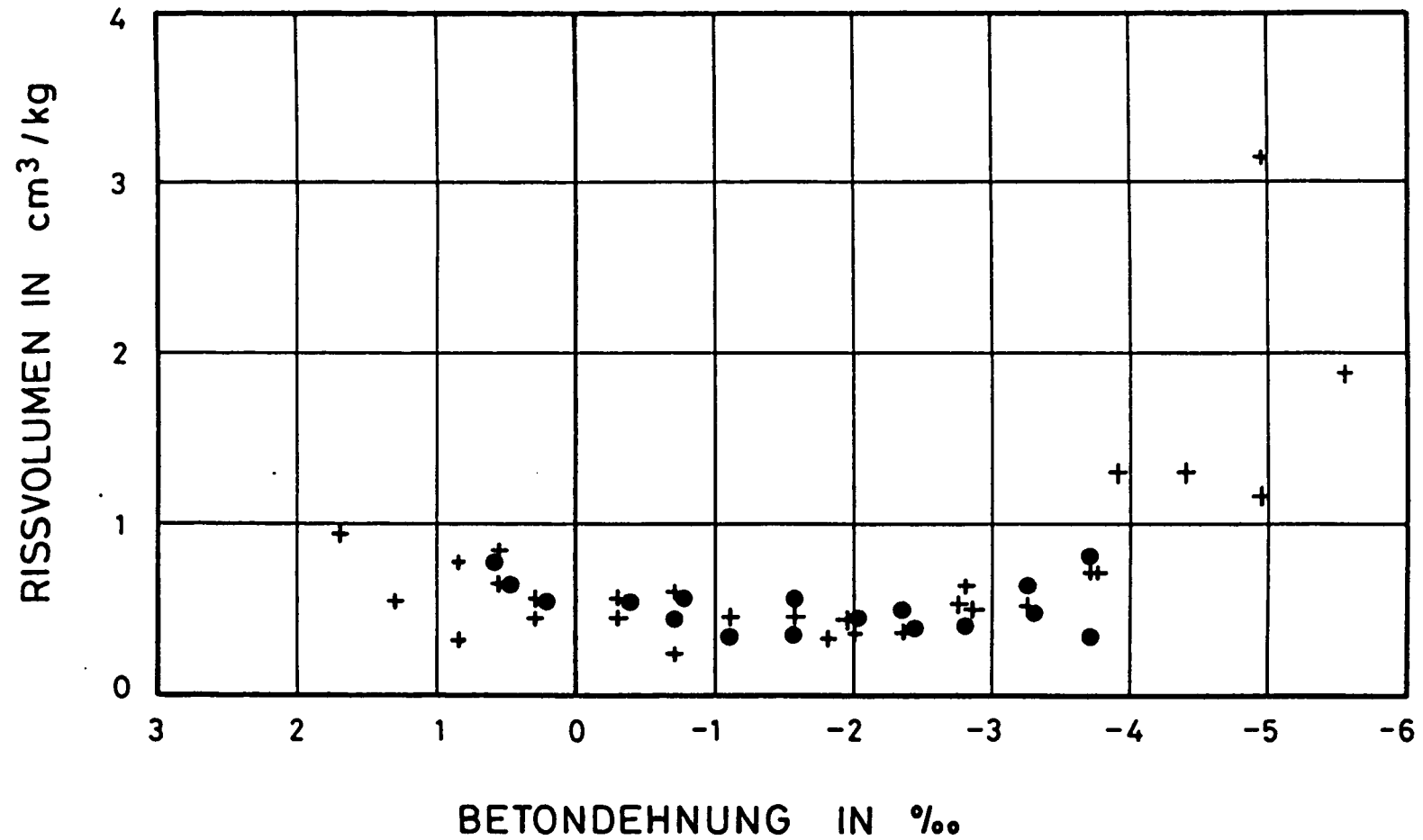
Abstand Mittelebene - lastferner Rand 115 mm

Dehnung in Mittelebene  $\max \epsilon_z = 0$ ,  $\max |\epsilon_D| = 4,95 \text{ ‰}$

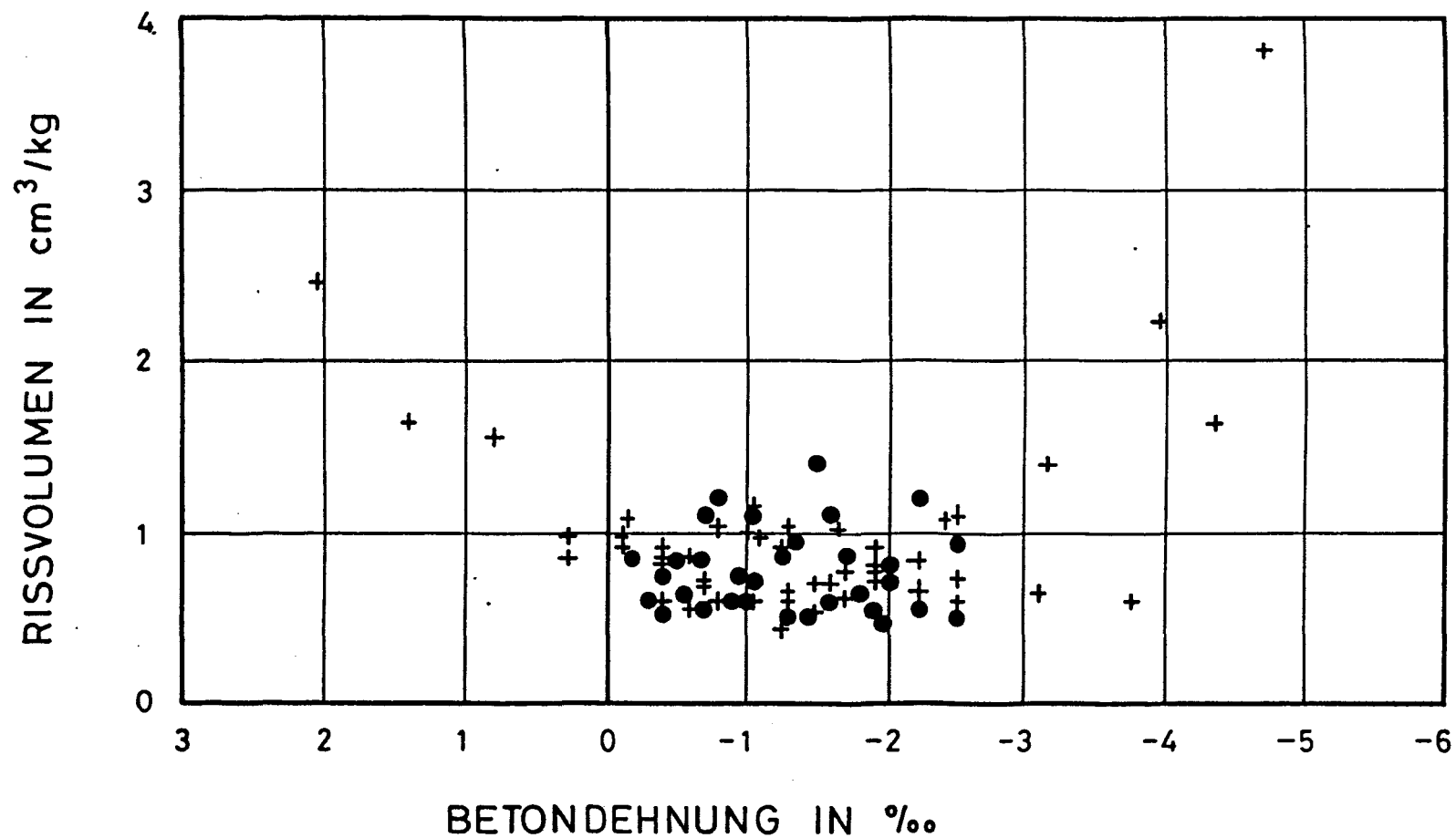




Integrales Poren- und Rißvolumen in einem hoch beanspruchten Prisma als Funktion der Betondehnung,  
 Porenradius bzw. Rißweite an der oberen Integrationsgrenze  $60 \mu\text{m}$ ,  
 untere Grenze als Parameter



Rißvolumen in Abhängigkeit von der Betondehnung bei schnell (+) und langsam (●) beanspruchtem Beton der Rezeptur II



Rißvolumen in Abhängigkeit von der Betondehnung bei schnell (+) und langsam (●) beanspruchtem Beton der Rezeptur III

DBB0R! 437 ✓

15. Jan. 1987

30 - 0161/001